



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# NÁVRH ZHÁŠENÍ ZAHOŘELÉHO PALIVA V MLÝNSKÉM OKRUHU KOTLE NA TEPLÁRNĚ KARVINÁ

THE EQUIPMENT FOR EXTINGUISH THE BLAZING COAL AT HEATPLANT  
KARVINÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. VÍTĚZSLAV ŠTĚRBA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.

BRNO 2014



## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce řeší problémy se samovzněcáním uhelného prášku v provozu Teplárny Karviná. První část je věnována možnostem spalování uhelného prášku a technickému popisu spalovacího zařízení na Teplárně Karviná. Druhá část pojednává o samotném fenoménu samovzněcování uhlé hmoty. V poslední části je řešen výpočet tepelné bilance mlýnského okruhu, jeho ochrany pomocí inertizace a především je stěžejní část diplomové práce věnována zásobníkům uhelného prášku, kde k zahořívání paliva nejčastěji dochází.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

mlýnský okruh, zásobník uhelného prášku, samovzněcování, zhášení, inertizace, havarijní vyprazdňování

## **ABSTRACT**

This master's thesis solves the coal dust autoignition problems in the heatplant Karviná. The first part is devoted to the combustion of pulverized coal possibilities and technical description at the heatplant Karviná equipment. The second part deals with the phenomenon of the coal self-ignition itself. In the last part the calculation of the mill circuit heat balance is solved as well as its inerting protection. The final part of the thesis is devoted to the coal powder reservoir, where the fuel blaze is the most common.

## **KEYWORDS**

mill circuit, coal powder reservoir, autoignition, extinguish, inerting, emergency emptying

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠTĚRBA, V. *Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Skály, CSc. dle svých znalostí, s použitím literatury uvedené v seznamu a s pomocí odborných konzultací.

V Brně dne 10. května 2014

.....

Bc. Vítězslav Štěrbá

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. Ing. Zdeňku Skálovi CSc. za vedení diplomové práce, cenné rady a za čas, který mi při zpracování práce věnoval. Dále chci poděkovat panu Jindřichu Dzikovi a jeho týmu z provozu Teplárny Karviná za zasvěcení do problému samovznícování uhlí a umožnění práce na letním projektu. Děkuji také panu Ing. Tadeášovi Podstawkovi Ph.D z firmy IHAS s.r.o. za rady při předcházení rizik spojených se samovznícením uhelné hmoty a možnostech řešení vzniklých problémů.

V neposlední řadě chci poděkovat především svým rodičům, kteří mi umožnili studovat a po celou dobu studia mě plně podporovali. Děkuji také své přítelkyni za důvěru a pochopení.

## Obsah

Úvod.....	11
1. Prášková ohniště .....	12
1.1 Výhody a nevýhody spalování uhelného prášku.....	12
1.2 Vlastnosti uhelného prášku .....	13
1.3 Příprava paliva .....	13
2. Technický popis zařízení na Teplárně Karviná .....	15
2.1 Kotel.....	15
2.2 Zauhlování.....	15
2.3 Mlýnský okruh .....	16
2.4 Zásobník uhelného prášku.....	17
3. Používané palivo na Teplárně Karviná .....	18
4. Spalování fosilních paliv .....	19
5. Samovzněcování uhlé hmoty .....	24
5.1 Příčiny vzniku procesu samovzněcování uhlí.....	24
5.1.1 Vysoká koncentrace polárních center na povrchu OA uhlí .....	26
5.1.2 Bohatě rozvinutý porézní systém OA uhlí.....	26
5.1.3 Atypická chemická struktura molekulárního skeletu OA uhlí.....	26
5.2 Indikace počátku procesu samovzněcování uhlí .....	27
5.2.1 Plynoměrné indikační metody .....	27
5.2.2 Teploměrné indikační metody .....	29
5.3 Hodnocení nebezpečí vzniku procesu samovzněcování uhlí .....	29
5.3.1 Metody stanovení náchylnosti uhlí k samovznícení .....	29
6. Studie CO na Teplárně Karviná.....	32
7. Ochrana proti výbuchu.....	33
8. Popis stávajícího problému a navrhované řešení .....	35
9. Předcházení vzniku samovznícení na skládce paliva a v mlýně:.....	36
10. Tepelný výpočet mlýnice a její inertizace .....	37
11. Předcházení vzniku samovznícení v zásobníku uhelného prášku .....	44
12.1 Konstrukční ochrana zásobníku .....	46
12.2 Systém Mosa Solution .....	46
12.3 Hašení již zahořelého paliva – inertizace zásobníku .....	47
12.4 Inertizace mlýnského okruhu .....	49
12.5 Zrušení zásobníku uhelného prášku .....	50
12.6 Havarijní výpusť ze zásobníku prášku přes čajník.....	50

## Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

12.7	Řešení havarijní situace .....	52
12.7.1	Havarijní plocha mimo kotelnu .....	52
12.7.2	Cisterny s dusíkem – šnekový dopravník .....	53
12.7.3	Páteční rozvod – pseudoprava .....	54
Závěr .....		56
Použité informační zdroje .....		57
Seznam použitých zkratk a symbolů .....		59
Seznam obrázků .....		62
Seznam grafů .....		62
Seznam tabulek .....		62
Seznam příloh .....		63



## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problémy se zahoříváním a vzněcováním uhelného prášku v mlýnských okruzích jednotlivých kotlů na Teplárně Karviná. Nejrizikovější místa, kde k zahořívání paliva dochází, jsou zásobníky uhelného prášku a samotné mlýny mlýnského okruhu. K vzněcování uhelného prášku nejčastěji dochází při náhlé odstávce kotle (např. při poruše), kdy v zásobníku uhelného prášku či v mlýně zůstává určitý objem paliva. Toto palivo již nejde spolehlivě a hlavně bezpečně z těchto lokalit odstranit a tak po nějaké době cca 2-3 dnů začne žhnout. Toto samovznícení paliva je z hlediska bezpečnosti zařízení a především osob konajících její obsluhu velmi nebezpečné. Při zahoření paliva totiž hrozí nekontrolovatelný dynamický nárůst teploty uvnitř zásobníku uhelného prášku s nebezpečím výbuchu. Je zřejmé, že v případě, kdy dojde k této události, hrozí škody na majetku a hlavně ztráty na lidských životech. Proto je tento problém třeba řešit.

V úvodu práce bude popsáno spalování a příprava uhelného prášku pro potřebu práškových ohnišť a spalování fosilních paliv. Hlavním tématem, okolo kterého se bude celá práce odvíjet, je zásobník uhelného prášku mlýnského okruhu. V první části bude jednoduše popsán kotel na teplárně Karviná, zauhlovací cesty a mlýnský okruh spolu se zásobníkem uhelného prášku. Dále bude popsáno palivo, které teplárna využívá a také hlavní důvody proč vlastně ke vzněcování uhelné hmoty dochází a některé nejpoužívanější metody ke zjištění samovznětlivosti uhlí. Okrajově bude také popsán protivýbuchový systém na teplárně Karviná.

Druhá část diplomové práce se bude již věnovat samotnému samovzněcování uhelného prášku, jeho předcházení, zabránění vzniku žhnoucích ohnisek a v neposlední řadě jeho úspěšnému uhašení. Základní ochrana před riziky výbuchu uhelné hmoty spočívá ve včasné identifikaci procesu samovznícení. Budou popsány metody identifikace zahoření na skládce paliva, v mlýně a samotném zásobníku uhelného prášku mlýnského okruhu. Pokud k zahoření paliva dojde, jsou pouze dvě možná řešení, co s uhelným práškem udělat. První je inertizace zásobníku popřípadě celého mlýnského okruhu. Jako druhá možnost, a dalo by se říci, že nejvhodnější, je řešení havarijní situace pomocí vyprázdnění zásobníku uhelného prášku. Při metodě inertizace je nutný výpočet tepelné bilance mlýnského okruhu pro získání množství inertizačního média nebo postup dle normy ČSN 38 9683 - Návod na inertizaci jako prevence proti výbuchu. Při řešení havarijní situace budou navrženy dvě možnosti řešení – havarijní vyprázdnění zásobníku do připravených vzduchotěsných cisteren pomocí kruhových šnekových dopravníků a vybudování páteřního rozvodu přes celou kotelnu TKV s dopravovaným práškem do sousedního práškovodu pomocí pseudopravy.

## 1. Prášková ohniště

Po první světové válce, s rozvojem průmyslu, došlo ke značnému ovlivnění vývoje parních kotlů. Kvůli neustále se zvětšujícímu požadavku kotlů o větších jmenovitých výkonech nastaly problémy s konstrukcí a provozem kotlových roštů. Bylo nutné najít jiné způsoby spalování tuhých paliv. Již začátkem minulého století se používalo spalování tuhých paliv v podobě prášku (u nás v roce 1909) v cementářských pecích. Nicméně spalování prášku u parních kotlů se podstatně liší a trvalo dalších téměř 20 let, než prášková ohniště trvale prorazila do provozu (první kotelna s práškovým ohništěm v roce 1927). K zavedení práškového topení také značně přispěla potřeba spalovat levné odpadní druhy paliv, popřípadě popelnatá a mokrá uhlí, která by bez přípravy paliva ve mlýně způsobila značné potíže při spalování na roštu. V Československu se práškové topení osvědčilo i z důvodu velké těžby uhlí.

Hlavní podstatou práškového topení je spalování jemně namletého uhelného prášku smíšeného se vzduchem, který se vhání do ohniště. V tomto směru se podobá spalování plyných paliv, kdy je možnost spalovat palivo ve vznosu. Svou podstatou se však blíží topení roštovému, neboť stejně jako na roštu probíhá i zde nejprve dosušování, dále zapálení a nakonec spálení tuhého paliva.

Mletý uhelný prášek je mechanicky zušlechtěné palivo. Zušlechtění je tím nákladnější, čím je jemnější mletí a čím nižší výhřevnost má výchozí palivo. Mletí má smysl jen tehdy, je-li spojeno se ziskem při spalování (tepelné a provozní výhody). [1, 2, 3]

### 1.1 Výhody a nevýhody spalování uhelného prášku

Mezi hlavní tepelné přednosti práškového topení patří dokonalé promísení paliva se spalovacím vzduchem s velmi malým přebytkem vzduchu, což vede ke zvýšení účinnosti a snížení komínové ztráty. Vysoké spalovací teploty s rychlým průběhem spalování a značnou svítivostí plamene poskytují větší tepelný spád a větší přestup tepla sáláním v ohništi, kdy se zároveň snižuje teplota spalin. Tyto vlastnosti umožňují velké měrné výkony nejen u průmyslových pecí, ale především u parních kotlů, jejichž spalovací komory jsou hustě vyskládány kotlovými výhřevnými plochami.

Za zmínku stojí také provozní přednosti práškových ohnišť. Jedná se především o výbornou říditelnost a pružnost ohniště, což znamená, že poměr paliva a vzduchu se může snadno a rychle pozměnit, což vede ke změně výkonu ohniště dle tepelné spotřeby. V práškovém ohništi se může spalovat jakékoliv tuhé palivo, kdy o hospodárnosti rozhodují pouze měrné mlecí náklady a měrné zatížení spalovacího prostoru. Práškové kotle se mohou rychle spouštět a odstavovat a spotřeba paliva při těchto provozních stavech není tak značná jako u roštových ohnišť.

U práškového topení je však nutné uvést i některé značné nevýhody. Jsou to náklady na přípravu uhelného prášku, tedy mletí a sušení paliva (potřebná energie na mletí, opotřebení mlecích elementů). Dále struskové a popílkové obtíže, kdy dochází k nánosům strusky na topné plochy ve spalovací komoře a v přehříváku páry a značnému úniku popílku do ovzduší, což se dnes důkladně řeší pomocí odprašování spalin. Jedno z největších nebezpečí je riziko samovznícení prášku a následných explozí a požárů. Z minulosti je zaznamenáno mnoho vážných nehod, které si vyžádaly bohužel i oběti na lidských životech. Tomuto problému se bude věnovat podstatná část této práce. [1]

## 1.2 Vlastnosti uhelného prášku

Při posuzování vhodnosti uhelného prášku pro spalování v ohništi se poukazuje především na tyto vlastnosti paliva:

- *Jemnost mletí uhelného prášku*, která se stanovuje pomocí rozsevyvy funkce, což je závislost velikosti zrn.
- *Ekonomická jemnost uhelného prášku*. Určena dvěma protiklady. S rostoucí jemností mletí roste účinnost celého zařízení, ale také náklady na mletí a opotřebení mlýna.
- *Obsah vody* - stupeň vysušení uhelného prášku. Vysoký obsah vody může vést k zalepování práškovodu, naopak vysoký stupeň vysušení vede k riziku samovznícení.
- *Hustota a sypná hmotnost uhelného prášku*, která závisí na obsahu vody
- *Měrná tepelná kapacita a měrná tepelná vodivost*, důležité při výpočtech sušení uhlí
- *Sypnost a sléhavost uhelného prášku*, důležité pro provoz podavačů a zásobníků
- *Výbušnost a samovznícení uhelného prášku* [4]

*Výbušností* se rozumí schopnost rozšířit spalování, vyvolané v libovolném místě práškového mraku o určité koncentraci na celý objem tohoto mraku. *Samovznícení* je schopnost paliva vznítit se bez cizího zdroje.

Rozvířený uhlý prášek představuje ve vzduchu výbušnou směs, která může při určitých situacích vést k poškození mlecího okruhu a způsobit zranění obsluhy. Především v uzavřených prostorách dojde při vznícení uhelného prášku k prudkému stoupnutí tlaku a v prostoru zaplněném práškem se šíří ve formě tlakové vlny (rychlost  $10^3$  m/s). Poté dochází k poškození mlecího zařízení a vyšlehnutí plamene.

Hlavní příčinou výbuchu je ohnisko hoření, vzniklé samovznícením prášku ukládaného ve vodorovných částech potrubí a různých koutech, v mlecím zařízení. Jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících výbušnost prášku je poměrný obsah prchavé hořlaviny  $V^{daf}$ . Do obsahu 14 % prchavé hořlaviny výbuch nehrozí, riziko se začíná výrazně projevovat až při obsahu hořlaviny okolo 25 %. Dalším faktorem ovlivňujícím výbušnost prášku je jeho jemnost a koncentrace. Naopak obsah popelovin výbušnost snižuje.

Nejlepším prostředkem ke snížení výbušnosti prášku je snížení obsahu kyslíku v prostředí (nahrazením  $CO_2$ ,  $N_2$  nebo vodní parou ze spalin). Dochází k inertizaci a k výbuchu nemůže dojít. [5]

## 1.3 Příprava paliva

Mezi základní operace přípravy uhelného prášku řadíme mletí, sušení, dopravu, skladování a odměřování.

Palivo se mele nárazem, roztlačováním nebo otěrem. Při mletí se zvětšuje reakční povrch uhlí pro spalování, řádově asi  $10^2$  krát více než před mletím. Spalování probíhá na povrchu částic paliva, který má značný vliv na rychlost a intenzitu spalování a rozhoduje tedy o době i stupni vyhoření uhelných částic (vliv na ztrátu mechanickým nedopalem). Při návrhu mlecích zařízení se musí počítat s investičními a především provozními náklady, jako je vlastní spotřeba při dopravě uhlí nebo pohon ventilátorů.

### Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

Sušení uhlí je jedinou možností, která umožňuje zkvalitnit méněhodnotná mokrá paliva pro spalování. Sušením se zvyšuje výhřevnost paliva, tím že vzrůstá spalné teplo a zmenšuje se výparné teplo vody v palivu. O tom, zda sušení probíhá ve zvláštním sušícím zařízení nebo přímo během mletí rozhoduje obsah vlhkosti paliva a ekonomické úvahy. Paliva s nižším obsahem vlhkosti, především černá uhlí, se suší během mletí.

Při přípravě uhelného prášku hraje významnou roli pneumatická doprava, která ovlivňuje téměř veškeré statické i dynamické vlastnosti mlecího okruhu i celého kotle. Je založena na silovém účinku proudu dopravního plynu na dopravovaná zrna uhelného prášku. Transportním médiem je buď vzduch, nebo jeho směs se spaliny, většinou obohaceným o vodní páru z procesu sušení.

Do přípravy paliva se také řadí třídění a odlučování prášku, podávání a uskladňování v zásobnících. [3, 5]



*Obr. 1 Trubnatý mlýn v kotelně Teplárny Karviná*

## 2. Technický popis zařízení na Teplárně Karviná

V této části práce je teoreticky popsáno spalovací zařízení na Teplárně Karviná, dále pak zauhlování, mlýnský okruh a především zásobník uhelného prášku, ve kterém dochází k samovznícení paliva nejčastěji.

### 2.1 Kotel

V kotelně Teplárny Karviná jsou umístěny 4 kotle s označením K1, K2, K3 a K4. Tyto kotle jsou sálavé, strmotrubné s granulární komorou systému Babcock – Wilcox od výrobce VŽKG. Tyto kotle jsou vybaveny čtyřmi práškovými hořáky a také čtyřmi plynovými hořáky za účelem hoření, které se provádí degazačním plynem z důlní degazace. Hlavním palivem je uhelný prášek, a dále se spalují granulované kaly a biomasa včetně dřevěných pilin. Nejdůležitější parametry kotle jsou uvedeny v následující tabulce. [6]

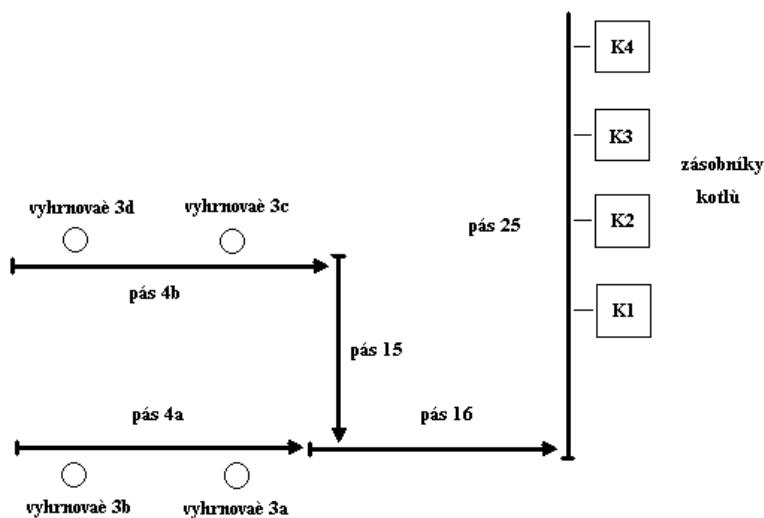
Tab. 1 Parametry kotle na TKV [6]

Jmenovitý výkon	85 t/hod (62MW)
Nejvyšší přetlak přehřáté páry	7,6 MPa
Pracovní přetlak přehřáté páry	7,45 MPa
Nejvyšší pracovní teplota přehřáté páry	485 - 495 °C
Pracovní teplota napájecí vody	180 °C
Výkon kouřového ventilátoru K1, K2, K3	185 000 m <sup>3</sup> /h
Výkon kouřového ventilátoru K4	240 000 m <sup>3</sup> /h
Výkon mlýna	20 t/h
Výkon sekundárního ventilátoru	55 200 Nm <sup>3</sup> /h
Výhřevná plocha ohříváku vzduchu	3700 m <sup>2</sup>
Výhřevná plocha přehříváku I. stupně	170 m <sup>2</sup>
Výhřevná plocha přehříváku II. stupně	350 m <sup>2</sup>
Výhřevná plocha ohříváku vody	1 450 m <sup>2</sup>
Podtlak ve spalovací komoře	-20 - 50 Pa

### 2.2 Zauhlování

Zauhlování je jeden z úseků zabezpečujících manipulaci s palivem. V podmínkách Teplárny Karviná se jedná o černý prach, kaly a biomasu včetně dřevěných pilin. Černý prach a kaly jsou dodávány v železničních vagónech, biomasa nákladními auty. Palivo se uskládá na skládce, míchá, hrne a transportuje do hlubinných zásobníků. Uhlí je dopravováno ze skládky do zásobníku surového paliva v kotelně pomocí dopravních gumových pásů. Hlavní pás (č. 16) ze zauhlování do kotelny je opatřen pásovou váhou. Kapacita zásobníku surového paliva je 250 tun. Ze zásobníku, který je opatřen svodkami a uzávěry, přichází palivo do řetězového dopravníku a mísícím šnekem do výstupního hrdla mlýna. [7]

## Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná



Obr. 2 Zjednodušené schéma zauhlování [7]

### 2.3 Mlýnský okruh

Provoz mlýnského okruhu se nachází na úrovni + 0,0 m. Zde jsou umístěny mlýny č.1 – 4. Surové uhlí se ze zásobníku podává řetězovým podavačem (redlerem) přes míchací šnek do potrubí nad výstupním hrdlem mlýna (sušící roura).

Potrubím mlýnského okruhu (vstupujícím do mlýna) je vedeno médium o teplotě dosahující až 300 °C. Směs uhelného prášku na výstupu z mlýna je unášena a zároveň sušena nosným médiem do třidiče, kde se oddělí hrubší frakce, které se znovu přivádějí do mlýna skluzným potrubím, kde se ještě dále suší a melou na prášek, který je nosným médiem unášen opět do třidiče. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud není dosaženo požadované jemnosti prášku.

Uhelný prášek, který prošel třidičem spolu se sušícím médiem, přichází do cyklónů, kde dochází k odlučování uhelného prášku (jeho odstředění od nosného média), který padá přes turniket do zásobníku uhelného prášku. Z cyklónů jsou brýdy odsávány ventilátorem a dále dopravovány jednak primárním potrubím do práškových hořáků spolu s uhelným práškem podávaným do tohoto potrubí komůrkovými podavači ze zásobníků uhelného prášku přes svodky a taktéž brýdovým potrubím do hořáků brýdových.

Výtlačové potrubí (práškovody) mlýnského ventilátoru je vyvedeno až k práškovým hořákům.

Mlecí zařízení tvoří následující části:

- Zásobník surového uhlí
- Podavač surového uhlí – redler
- Trubnatý mlýn s třidičem
- Potrubí sušícího média s práškovody
- 2 ks odlučovače uhelného prášku s turnikety
- Mlýnský ventilátor
- Zásobník uhelného prášku
- 4 ks podavače uhelného prášku
- Reverzní dopravní šnek
- Klapky sloužící k ovládání průtoků jednotlivými potrubními větvemi [8]



## 2.4 Zásobník uhelného prášku

Zásobníky práškového uhlí jsou umístěny na kótě 17,5 m. Práškové uhlí se do zásobníků přivádí z trubnatých mlýnů potrubím uzavřeného mlýnského okruhu přes třídiče, cyklóny a turniketové uzávěry. Jeden práškový zásobník pojme cca 30 m<sup>3</sup>.

Zásobníky práškového uhlí všech kotlů jsou umístěny v řadě za sebou. Na stropě zásobníku je umístěn příčný šnek. Konstrukce zásobníků je železobetonová. Uhlí ze zásobníků se do kotle přivádí přes komůrkové podavače, umístěné na kótě 8,5 m do práškovodů k hořákům. Každý zásobník je opatřen vstupním otvorem s uzamykatelným víkem a výdušným potrubím na střechu, v němž je umístěna membrána. U každého zásobníku je instalováno měření hladiny prášku, měření teploty, přívod z hasící CO<sub>2</sub> baterie a 5 ks akčních prvků ochranného systému, který slouží k potlačení výbuchu uvnitř uzavřených zařízení. [9]



*Obr. 3 Výsypky zásobníku uhelného prášku*

### 3. Používané palivo na Teplárně Karviná

Na Teplárně Karviná, společnosti DALKIA ČR a.s. jsou dopravovány a spalovány tyto látky:

- Energetický prach 0-20 – Důl – Darkov
- Černouhelný granulát
- Biomasa (obilný šrot a dřevní piliny) [8]

Tab. 2 Vybrané vlastnosti paliv [8]

	Materiál	
	E. Prach 0 - 20, Darkov	Černouhelný granulát
Hořlavá látka	prach	prach
Obsah vody	9,97 %	10,1 %
Obsah popele	19,8 %	29,2 %
Obsah prchavé hořlaviny	21,3 %	21,1 %
Obsah fixního uhlíku	58,3 %	49,2 %
Střední velikost zrna	cca 0,03 mm	<< 0,04 mm
Teplota vznícení usazeného prachu	543 °C	528 °C
Teplota žhnutí usazeného prachu	236 °C	166 °C
Teplota vzplanutí usazeného prachu	280 °C	320 °C
Teplota vznícení rozvířeného prachu	593 °C	632 °C

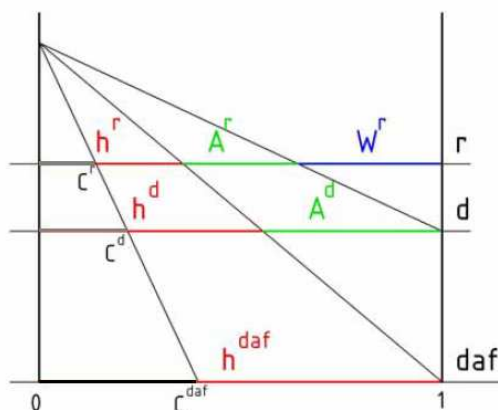
U energetického prachu 0 – 20 z dolu Darkov je navíc přiřazen údaj o jeho náchylnosti k samovznícení. Indukční doba samovznícení z teploty 80 °C se pohybuje okolo 74 hodin. [8]



## 4. Spalování fosilních paliv

Pro výpočet stechiometrie je třeba znát prvkové složení paliva. Tuhá paliva mohou být definována při určitých stavech:

- $r$  (real) – původní (hořlavina  $h$  + popelovina  $A$  + voda  $W$ )
- $d$  (dry) – bezvodý (hořlavina  $h$  + popelovina  $A$ )
- $daf$  (dry ashfree) – stav bez vody a popela (jen hořlavina  $h$ ) [10]



Obr. 4 Znáznornění jednotlivých stavů [10]

Palivo spalované na Teplárně Karviná pochází z oblasti Ostravsko – Karvinských dolů. Toto uhlí má prvkové složení uvedené v následující tabulce. Výpočet je řešen pomocí literatury uvedené v seznamu. [10]

Tab. 3 Prvkové složení černého uhlí z OKD

$C^{daf}$	$H^{daf}$	$S^{daf}$	$O^{daf}$	$N^{daf}$	$A^r$	$W^r$
88 %	3,3 %	0,6 %	7 %	1 %	21,1 %	10 %

- přepočítání stavu  $daf$  na stav  $r$ :

$$C^r = C^{daf} \times (1 - W^r - A^r) = 0,88 \times (1 - 0,1 - 0,211) = 0,6066 \sim 60,7 \% \quad (4.1)$$

$$H^r = H^{daf} \times (1 - W^r - A^r) = 0,033 \times (1 - 0,1 - 0,211) = 0,0227 \sim 2,3 \% \quad (4.2)$$

$$S^r = S^{daf} \times (1 - W^r - A^r) = 0,006 \times (1 - 0,1 - 0,211) = 0,0041 \sim 0,4 \% \quad (4.3)$$

$$O^r = O^{daf} \times (1 - W^r - A^r) = 0,07 \times (1 - 0,1 - 0,211) = 0,0482 \sim 4,8 \% \quad (4.4)$$

$$N^r = N^{daf} \times (1 - W^r - A^r) = 0,001 \times (1 - 0,1 - 0,211) = 0,0068 \sim 0,7 \% \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} C^r + H^r + S^r + O^r + N^r + A^r + W^r \\ = 60,7 + 2,3 + 0,4 + 4,8 + 0,7 + 21,1 + 10 = 100 \% \end{aligned} \quad (4.6)$$

---

Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

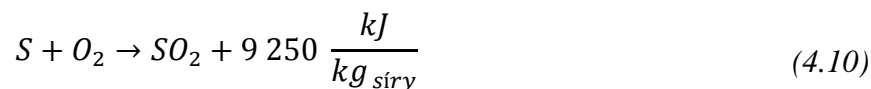
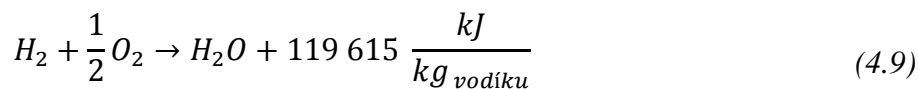
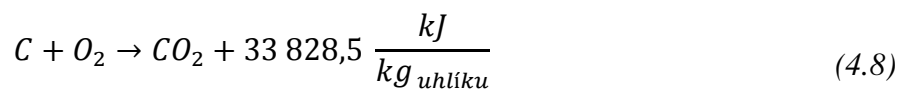
- stanovení výhřevnosti – Dulongův vzorec pro černá uhlí a antracitu:

$$Q_i^r = 339,1 \times C^r + 1214,2 \times H^r - 151,8 \times O^r + 104,7 \times S^r - 24,5 \times W^r \quad (4.7)$$

$$= 339,1 \times 60,7 + 1214,2 \times 2,3 - 151,8 \times 4,8 + 104,7 \times 0,4 - 24,5 \times 10$$

$$= 22\,444 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- stechiometrické výpočty:  
Slouží ke zjištění množství vzduchu, které je nutno pro spálení paliva, a ke zjištění množství spalin, které tímto spálením vzniknou.



- stechiometrický objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva:

$$O_{O_2 \min} = 22,39 \times \left( \frac{C^r}{100 \times 12,01} + \frac{H^r}{100 \times 4,032} + \frac{S^r}{100 \times 32,06} - \frac{O^r}{100 \times 32} \right) \quad (4.11)$$

$$= 22,39 \times \left( \frac{60,7}{100 \times 12,01} + \frac{2,3}{100 \times 4,032} + \frac{0,4}{100 \times 32,06} - \frac{4,8}{100 \times 32} \right)$$

$$= 1,29 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}}$$

- stechiometrické množství suchého vzduchu:

$$O_{VS \min} = \frac{O_{O_2 \min}}{0,2103} = \frac{1,29}{0,2103} = 6,13 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \quad (4.12)$$

- stechiometrické množství vlhkého vzduchu:

$$O_{VV \min} = \chi_V \times O_{VS \min} = 1,012 \times 6,13 = 6,2 \frac{\text{m}_N^3}{\text{kg}} \quad (4.13)$$

$$\chi_V = 1 + \varphi \times \frac{p''}{p_{\text{bar}} - \varphi \times p''} = 1 + 0,5 \times \frac{0,0023368}{0,101325 - 0,5 \times 0,0023368} = 1,012 \quad (4.14)$$

## Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

 $\varphi$  [–] relativní vlhkost vzduchu $p_{bar}$  [MPa] okolní tlak $p''$  [MPa] parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu

Tab. 4 Parciální tlak vodní páry v závislosti na teplotě [10]

$t_{vz}$ [°C]	0	10	20	30	40	50
$p''$ [kPa]	0,6108	1,2277	2,3368	4,2416	7,3742	12,3316

- objem vodní páry ve spalovacím vzduchu:

$$O_{VV,H_2O \min} = O_{VV \min} - O_{VS \min} = 6,2 - 6,13 = 0,07 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.15)$$

- stechiometrický objem suchých spalín:

$$\begin{aligned} O_{SS \min} &= \frac{22,26}{12,01} \times \frac{C^r}{100} + \frac{21,89}{32,06} \times \frac{S^r}{100} + \frac{22,4}{28,016} \times \frac{N^r}{100} + 0,7897 \times O_{VS \min} \\ &= \frac{22,26}{12,01} \times \frac{60,7}{100} + \frac{21,89}{32,06} \times \frac{0,4}{100} + \frac{22,4}{28,016} \times \frac{0,7}{100} + 0,7897 \times 6,13 \\ &= 5,9 \frac{m_N^3}{kg} \end{aligned} \quad (4.16)$$

- stechiometrický objem vodní páry ve spalínách

$$\begin{aligned} O_{SV,H_2O \min} &= \frac{44,8}{4,032} \times \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,016} \times \frac{W^r}{100} + O_{VV,H_2O \min} \\ &= \frac{44,8}{4,032} \times \frac{2,3}{100} + \frac{22,4}{18,016} \times \frac{10}{100} + 0,07 = 0,45 \frac{m_N^3}{kg} \end{aligned} \quad (4.17)$$

- stechiometrický objem vlhkých spalín

$$O_{SV \min} = O_{SS \min} + O_{SV,H_2O \min} = 5,9 + 0,45 = 6,35 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.18)$$

- skutečné množství suchého vzduchu:

$$O_{VS} = \alpha \times O_{VS \min} = 1,2 \times 6,13 = 7,34 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.19)$$

 $\alpha$  [–] součinitel přebytku vzduchu

---

Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

Tab. 5 Závislost optimálního přebytku vzduchu dle typu ohniště [11]

typ ohniště	$\alpha_{opt}$
roštová	1,3 – 1,5
prášková	1,20
výtavná	1,15
olejová	1,01 – 1,15
plynová	1,01 – 1,10

- skutečné množství vlhkého vzduchu:

$$O_{VV} = \chi_V \times O_{VS} = 1,012 \times 7,34 = 7,43 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.20)$$

- skutečné množství suchých spalín:

$$O_{SS} = O_{SS \min} + (\alpha - 1) \times O_{VS \min} = 5,9 + (1,2 - 1) \times 6,13 = 7,13 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.21)$$

- skutečné množství vlhkých spalín:

$$O_{SV} = O_{SV \min} + (\alpha - 1) \times O_{VV \min} = 6,35 + (1,2 - 1) \times 6,2 = 7,59 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.22)$$

- složení skutečných spalín:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \times \frac{C^r}{100} = \frac{22,26}{12,01} \times \frac{60,7}{100} = 1,13 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.23)$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \times \frac{S^r}{100} = \frac{21,89}{32,06} \times \frac{0,4}{100} = 0,0027 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} O_{N_2} &= \frac{22,4}{28,016} \times \frac{N^r}{100} + 0,7897 \times O_{VS} = \frac{22,4}{28,016} \times \frac{0,7}{100} + 0,7897 \times 7,34 \\ &= 5,8 \frac{m_N^3}{kg} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$O_{O_2} = (\alpha - 1) \times 0,2103 \times O_{VS \min} = (1,2 - 1) \times 0,2103 \times 6,13 = 0,26 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.26)$$

$$O_{H_2O} = \frac{44,8}{4,032} \times \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,016} \times \frac{W^r}{100} + (\chi_V - 1) \times O_{VS} \quad (4.27)$$

$$= \frac{44,8}{4,032} \times \frac{2,3}{100} + \frac{22,4}{18,016} \times \frac{10}{100} + (1,012 - 1) \times 7,34 = 0,47 \frac{m_N^3}{kg} \quad (4.28)$$

---

Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

- objemové podíly v suchých spalínách:

$$\omega_{SS,CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SS}} = \frac{1,13}{7,13} = 0,16 \quad (4.29)$$

$$\omega_{SS,SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{SS}} = \frac{0,0027}{7,13} = 0,00039 \quad (4.30)$$

$$\omega_{SS,N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{SS}} = \frac{5,8}{7,13} = 0,81 \quad (4.31)$$

$$\omega_{SS,O_2} = \frac{O_{O_2}}{O_{SS}} = \frac{0,26}{7,13} = 0,0036 \quad (4.32)$$

$$\omega_{SS,CO_2} + \omega_{SS,SO_2} + \omega_{SS,N_2} + \omega_{SS,O_2} = 1,00 \quad (4.33)$$

- objemové podíly ve vlhkých spalínách:

$$\omega_{SV,CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SV}} = \frac{1,13}{7,59} = 0,15 \quad (4.34)$$

$$\omega_{SV,SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{SV}} = \frac{0,0027}{7,59} = 0,00036 \quad (4.35)$$

$$\omega_{SV,N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{SV}} = \frac{5,8}{7,59} = 0,76 \quad (4.36)$$

$$\omega_{SV,O_2} = \frac{O_{O_2}}{O_{SV}} = \frac{0,26}{7,59} = 0,03 \quad (4.37)$$

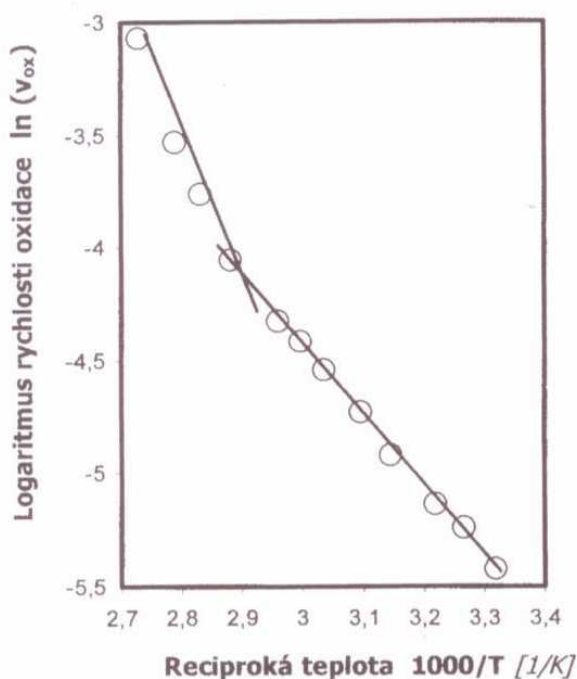
$$\omega_{SV,H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SV}} = \frac{0,47}{7,59} = 0,06 \quad (4.38)$$

$$\omega_{SV,CO_2} + \omega_{SV,SO_2} + \omega_{SV,N_2} + \omega_{SV,O_2} + \omega_{SV,H_2O} = 1,00 \quad (4.39)$$

## 5. Samovzněcování uhelné hmoty

Za známé a často zmiňované důvody samovzněcování uhlí jsou považovány například činnost bakterií, elektrochemické procesy v uhelné hmotě nebo působení vodní páry. Nicméně základním protiargumentem je skutečnost, že doposud nebyl popsán případ samovznícení uhlí, který by nastal bez přítomnosti kyslíku. Z toho důvodu se předpokládá, že kyslík je stěžejním prvkem celého procesu samovznícení. Samovzněcování uhlí je pokračující fází nízkoteplotní oxidace, což je proces zcela běžný, a kterému podléhají všechny typy uhlí, které se dostanou do kontaktu se vzdušným kyslíkem.

Objektivnější odlišení nízkoteplotní oxidace od samovzněcování je možné rozpoznat na následujícím grafu závislosti rychlosti oxidace uhlí na teplotě. Tato závislost udává lineární závislost se zlomem okolo určité teploty. Tato teplota se nachází okolo hodnoty 70 – 120 °C a je udávána jako kritická teplota samovznícení  $T_{ks}$ . V této souvislosti se jako nízkoteplotní oxidace označuje teplota uhlí, která nepřesahuje  $T_{ks}$ , v tomto případě tedy hodnoty okolo 80 °C. Při překročení této hodnoty získává oxidační proces dynamičtější charakter a dochází k samovznícení uhlí. [12]



Graf 1 Závislost rychlosti oxidace  $v^{ox}$  na teplotě uhlí  $T$  v Arrheinových souřadnicích [12]

### 5.1 Příčiny vzniku procesu samovzněcování uhlí

Dodnes se nepodařilo najít v uhelné hmotě ten aspekt, který zapříčiňuje, že oxidace daného uhlí po nízkoteplotní fázi pokračuje v proces samovzněcování. Známa a zřejmě nejrozšířenější teorie samovzněcování uhlí spočívá v exotermní reakci pyritu s kyslíkem a vodními parami. Nicméně testování bohatého souboru uhlí s různým obsahem pyritu nepotvrdilo souvislost oxireaktivitu uhlí s obsahem síry a železa. Na druhou stranu však existuje případ, který se odehrál při demontáži degazačního potrubí na dole v kazašské

### Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

Karagandě, kdy ke vznícení uhlí došlo již po 10 minutách. Po provedené analýze bylo zjištěno, že za tuto obrovskou oxireaktivitu můžou právě labilní sloučeniny síry a železa.

Příčiny zvýšení reaktivity uhlí vůči kyslíku spočívají v tom, že mezi černouhelnými vzorky v OKR (Ostravsko-Karvinský revír) zauímají zcela zvláštní kategorii oxidačně alterovaná uhlí (OA), která vykazují téměř řádově vyšší oxidační tepla  $q^{30}$ . Oxidačně alterovaná uhlí se v OKR vyskytují u těles pestrých vrstev a právě v těchto lokalitách velice často dochází ke samovznícovacímu procesu.

V následující tabulce jsou porovnány vlastnosti nealterovaných uhlí a oxidačně alterovaných uhlí na dole Dukla. Za zvýšenou náchylnost k samovznícení oxidačně alterovaných uhlí je nejspíše odpovědná:

- Vysoká koncentrace polárních center na povrchu oxidačně alterovaných uhlí.
  - Bohatě rozvinutý porézní systém oxidačně alterovaných uhlí.
  - Atypická chemická struktura molekulárního skeletu oxidačně alterovaných uhlí.
- [12]

Tab. 6 Vybrané vlastnosti uhlí na dole Dukla [12]

	Nealterovaná uhlí	Oxidačně alterovaná uhlí
	Dukla	Dukla
<b>Základní parametry</b>		
obsah vody $W^a$ [%]	1.5	14.8
obsah popela $A^d$ [%]	5.4	18
obsah prchavých látek $V^{daf}$ [%]	32.8	35,5
<b>Elementární analýza</b>		
molární procenta obsahu uhlíku $C_{at}^{daf}$ [%]	55.9	56.7
molární procenta obsahu vodíku $H_{at}^{daf}$ [%]	38.2	26.7
molární procenta obsahu kyslíku $O_{at}^{daf}$ [%]	5.1	14.3
<b>Strukturní parametry</b>		
uhlíková aromaticita $f_a$ [-]	0.75	0,91
koncentrace volných radikálů $N^e$	1.2	0,38
<b>Texturní parametry</b>		
objem pórů $V^p$ [cm/g]	0.023	0.12
celková porozita $P$ [%]	7.5	25
dobu, za kterou prodifunduje plyn do 1 mm uhlí $T^d$ [s/mm]	>40	1.8
<b>Oxireaktivita <math>q^{30}</math> [J/g]</b>	0.7	3.4

Mezi doplňující faktory, ovlivňující proces samovznícení se zařazují:

- Stupeň prouhelnění: se stoupajícím obsahem uhlíku nebo klesajícím obsahem kyslíku se rychlost oxidace snižuje.

---

Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

- Obsah prchavých látek: zvýšený obsah prchavé hořlaviny zvyšuje rychlost oxidace. Experimentem bylo zjištěno, že uhlí obsahující 38 % prchavých látek oxiduje třikrát rychleji než uhlí s obsahem 18 % prchavých látek.
- Přirozená vlhkost: souvisí s pórovitostí uhlí. [13]

### 5.1.1 Vysoká koncentrace polárních center na povrchu OA uhlí

U alternovaného uhlí na první pohled zaujme výrazný, téměř trojnásobný nárůst obsahu kyslíku v porovnání s původním uhlím a také vysoký obsah vlhkosti. Oxidační alternací získalo uhlí hydrofilní charakter. Následná oxidace je přítomnou vlhkostí ovlivňována odlišným způsobem nežli původní hydrofobní uhlí. Zatímco oxidace nealterovaného uhlí je přítomnou vlhkostí zpomalována, naopak v případě okysličování OA uhlí hraje vlhkost urychlující roli. Toto oxidačně alternující uhlí se díky těmto vlastnostem řadí spíše k hnědouhelným typům uhlí. [12]

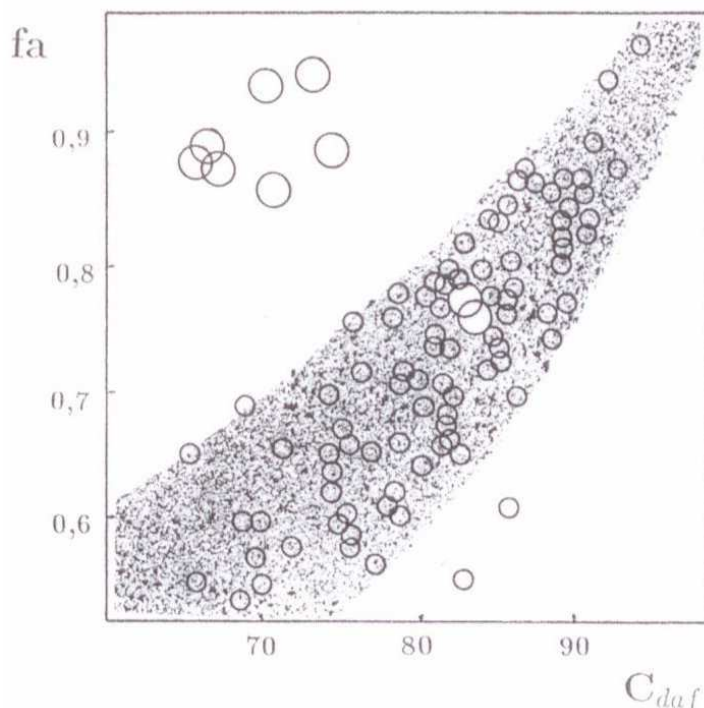
### 5.1.2 Bohatě rozvinutý porézní systém OA uhlí

V porézních systémech vzorků uhlí byly zjištěny obrovské odlišnosti. U OA uhlí je jejich celková pórovitost okolo 25 %, kdežto u původního uhlí je to pouze 7,5 %. Z výsledků vysokotlaké rtuťové pórometrie lze vyčíst, že k rozvoji došlo především u makro a mezopórů (viz hodnoty  $V^p$  z tabulky), což jsou póry, které bezprostředně ovlivňují transportní podmínky kyslíku k reakčním centrům v uhelné hmotě. To také potvrdila i měření difúzní propustnosti  $T^d$ , která odpovídá době, za kterou pronikne plynný dusík do hloubky 1 mm uhlí. U oxidačně alterovaných uhlí je vidět, že transport plynu do jejich porézního systému je řádově rychlejší než u původního uhlí. Tyto odlišné podmínky transportu kyslíku do uhelné hmoty pak vedou k rozdílnému vlivu zrnitosti na oxidační teplo  $q^{30}$ . Pro původní, málo porézní uhlí je typický pokles hodnot oxidačního tepla s narůstajícím průměrem zrn uhlí. Naproti tomu hodnoty oxidačního tepla u vysoce porézního uhlí jsou na zrnitosti v podstatě nezávislé. [12]

### 5.1.3 Atypická chemická struktura molekulárního skeletu OA uhlí

Výsledky elementární analýzy ukázaly, že obsah uhlíku zůstává v obou druzích uhlí přibližně stejný. Naopak při výstavbě molekulárního skeletu hraje uhlík u obou typů uhlí odlišnou úlohu. Zatímco u původního vzorku uhlí se na tvorbě aromatické části skeletu podílí 75 % uhlíku, u OA je to již 91 %. Tato hodnota vytváří spolu s téměř 15 % kyslíku z oxidačně alterovaných uhlí zcela výjimečnou substanci. Podle vysokého obsahu kyslíku se podobají spíše hnědouhelným typům uhlí, naopak podle hodnoty aromaticity k antracitovým typům. [12]





Graf 2 Závislost uhlíkové aromaticity  $f_a$  na obsahu uhlíku v hořlavině  $C_{daf}$  [12]

## 5.2 Indikace počátku procesu samovzněcování uhlí

Základním bezpečnostním i ekonomickým požadavkem je zajistit příznaky samovzněcování uhlí již v jeho raném stádiu, aby se vzniklá situace dala bez negativních důsledků řešit. Jako indikační metody mohou být použity plynoměrné metody (monitorování úbytku kyslíku, či přírůstku oxidačních zplodin) nebo teploměrné metody (lokalizace a monitorování místa se zvýšenou teplotou oproti teplotě okolí). [12]

### 5.2.1 Plynoměrné indikační metody

Této metody se používá jako indikace samovzněcovacího procesu na základě úbytku kyslíku. Mezi plynné produkty oxidace uhlí patří široká škála chemických látek (voda, oxidy uhlíku, uhlovodíky, vodík, oxidy síry...). Navíc řadu z těchto látek lze detekovat již při 0 °C. Jako nejpoužívanější indikátory samovznícení se používá oxid uhelnatý a uhlovodíky.

#### Vývin oxidu uhelnatého:

Oxid uhelnatý se jako indikátor samovzněcovacího procesu v důlním prostředí používá již od první poloviny 20. století. Zásadní práce tehdy provedl J. I. Graham a jeho poměr vývinu oxidu uhelnatého CO (%) s deficitem kyslíku  $\Delta O_2^{def}$  (%) se používá dodnes a je znám jako Grahamův index CO nebo také požární ukazatel. Aplikace tohoto ukazatele vychází z rozdílných dynamik vývinu oxidu uhelnatého a spotřeby kyslíku při oxidaci uhlí za různých

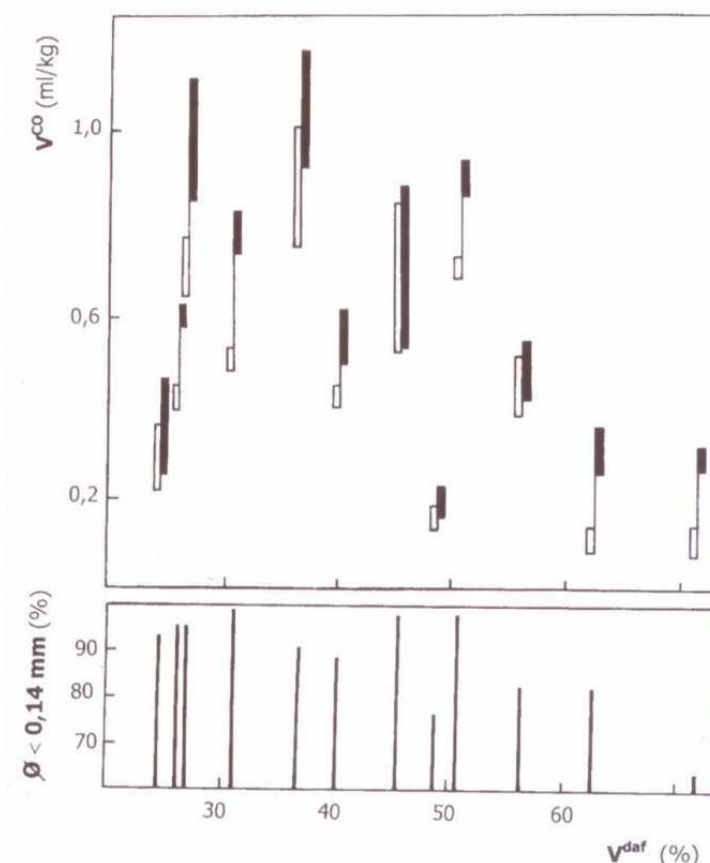
### Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

teplot (vývin CO roste s teplotou uhlí rychleji nežli spotřeba kyslíku. Následující tabulka ukazuje typické rozmezí hodnot Grahamova indexu. [12]

Tab. 7 Rozmezí hodnot Grahamova indexu [12]

Stav ve sledovaném úseku	Hodnota Grahamova indexu ( $100 \cdot \text{CO} / \Delta \text{O}_2^{\text{def}}$ )
Normální stav (nizkoteplotní oxidace)	0,1 - 0,5 %
Rozvíjející se záparový proces	0,5 - 1 %
Pokročilý zápar	1 - 2 %
Zápar přecházející v oheň	3 % a více

Následující graf ukazuje vývin oxidu uhelnatého při mletí uhlí. Experiment byl proveden na 12-ti vzorcích uhlí s různým stupněm prouhelnění. Mletí probíhalo pouze půl minuty a probíhalo v prostředí čistého kyslíku (černé obdélníčky) a v inertním prostředí argonu (bílé obdélníčky). Byl studován vliv času a teploty na hodnoty vývinu oxidu uhelnatého  $V^{\text{CO}}$  (ml CO/kg uhlí). [12]



Graf 3 Závislost vývinu oxidu uhelnatého při mletí  $V^{\text{CO}}$  na obsahu uhlíku v hořlavině  $C^{\text{daf}}$  [12]

### 5.2.2 Teploměrné indikační metody

Teploměrná indikace samovznícení uhlí je založena na identifikaci místa v uhelné hmotě (hromada uhlí) s netypicky zvýšenou teplotou oproti okolí nebo rozpoznání míst, kde v určitém časovém období dochází k narůstání teploty. Výhodou této metody je možnost lokalizace ohniska samovzněcovacího procesu. V dnešní době se stále používá oblíbená termometrie, která je založena na využívání kontaktních teploměrů (odporový, termistorový...). Dále se používají bezkontaktní infračervené teploměry. Nejlepší vypovídací schopnost má termovize, kdy je zkoumaný povrch snímám infračervenou kamerou, a na monitoru se zobrazuje rozložení povrchových teplot sestavených z izotermních plošek různých barev. [12]

### 5.3 Hodnocení nebezpečí vzniku procesu samovzněcování uhlí

Snahou pracovníků, majících co do činění s uhelnou hmotou, je mít informace o míře nebezpečí vzniku samovznícení uhlí. Získání této informace však není vůbec jednoduché, neboť na procesu samovznícení se podílí celá řada faktorů a vlivů. Většina expertů v této oblasti se shoduje, že tyto faktory můžeme rozdělit do dvou skupin:

- *Vnitřní faktory* – jsou bezprostředně svázány s uhelnou hmotou a celkově se projevují konkrétní úroveň náchylnosti daného uhlí k samovznícení (hodnocení uhlí v laboratoři)
- *Vnější faktory* – zahrnují geologické, technologické, hydrogeologické či mikroklimatické aspekty (šetření v podmínkách in situ) [12]

#### 5.3.1 Metody stanovení náchylnosti uhlí k samovznícení

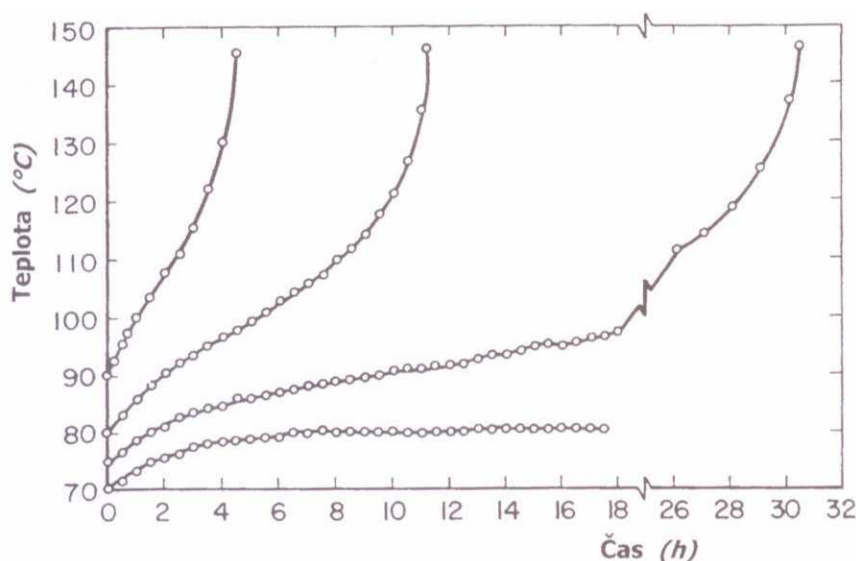
Náchylnost uhlí k samovzněcovacímu procesu je považována za vlastnost uhelné hmoty, kterou lze určit laboratorní zkouškou. Avšak všechny popsání metody hodnotí chování uhlí v oxidačním procesu. Neexistuje tedy žádná speciální metoda pro stanovení náchylnosti uhlí k samovznícení, ale pouze k oxidaci. Je tedy nasnadě požívat místo termínu „náchylnost k samovznícení“ spíše „náchylnost uhlí k oxidaci“ popřípadě „oxireaktivita uhlí“. Nicméně i v odborné literatuře jsou tyto pojmy zaměňovány. Navíc nebyla dodnes představena oficiální metoda, která by se stala mezinárodně používaným postupem objektivního hodnocení uhlí z hlediska oxireaktivity. [12]

#### Metoda oxidace uhlí za adiabatických podmínek (metoda adiabatické oxidace):

Základem této metody je oxidace uhlí v adiabatickém kalorimetru, kdy nedochází k výměně tepla mezi zkoumaným systémem a okolím, ale veškeré uvolněné teplo se spotřebuje na zvyšování teploty uhlí. Tato metoda se považuje za nejrealnější napodobení průběhu samovzněcovacího procesu téměř na celém světě. U nás se stala základní metodou hodnocení oxireaktivity černých uhlí a u hnědých dokonce postupem normovaným.

Před vlastním měřením se v celém systému se vzorkem uhlí ustálí teplota při zvolené počáteční teplotě  $T_0$  (uhlí je po tuto dobu v ochranné inertní atmosféře). Vlastní měření začíná zavedením oxidujícího plynného média (vzduchu či kyslíku) do systému. V průběhu experimentu se zaznamenává především časová závislost teploty uhlí, ale například také spotřeba kyslíku nebo vývin jednotlivých produktů ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ). [12]

## Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná



Graf 4 Průběhy závislosti teplota vs. čas metody adiabatické oxidace při různých počátečních teplotách [12]

Metoda pulzní kalorimetrie:

Princip této metody spočívá v nadávkování známého objemu kyslíku do průtoku inertního plynu a ve sledování tepelných projevů vyvolaných průchodem této dávky kyslíku skrze daný vzorek. Metoda umožňuje přímé změření uvolněného oxidačního tepla  $q^{30}$ , jehož hodnota je také základním ukazatelem pro posouzení samovznícení daného uhlí.

Výhodou této metody je, že dokáže věrohodně odlišit teplo vyvinuté při reakci kyslíku s uhlím od tepelných projevů vyvolaných fázovými přechody vody. Ukazatel  $q^{30}$  tedy představuje oxidační teplo neovlivněné kondenzačním teplem nebo odpařováním vody.

Uhlí se zařazuje do 3 kategorií dle náchylnosti k samovznícení dle následujících mezních hodnot oxidačního tepla  $q^{30}$ . [12]

Tab. 8 Rozdělení náchylnosti uhlí k samovznícení [12]

Kategorie náchylnosti k samovznícení	$q^{30}$ [J/g] pro černá uhlí
I. Vysoce reaktivní uhlí	$> 0,85$
II. Reaktivní uhlí	$0,35 - 0,85$
III. Nereaktivní uhlí	$< 0,35$

Olpinského metoda:

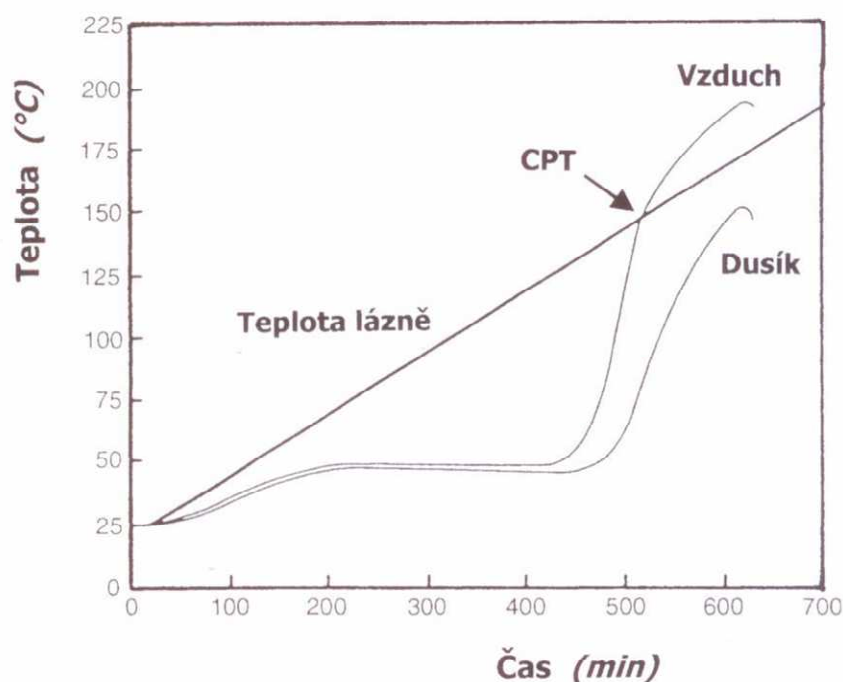
Tato metoda spočívá v měření rychlosti vzestupu teploty uhelného vzorku slisovaného do briketky přesně definovaných rozměrů. Na briketku se nasune termočlánek, který měří teplotu, a společně jsou vloženy do reakčního prostoru. V tomto prostoru protéká vzduch ohříváný parami vroucí kapaliny. Jako ukazatel samovzněcovacího procesu daného vzorku uhlí je z experimentálně získané křivky teplota vs. čas vyhodnocena rychlost vzrůstu teploty v tzv. adiabatickém bodě (místo, kdy se vyrovná teplota uhlí a s teplotou procházejícího vzduchu). [12]

## Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

Metoda CPT (Crossing-Point Temperature, metoda teplotního průsečíku):

Princip metody CPT spočívá ve sledování teploty vzorku uhlí umístěného v topné peci s lineárním nárůstem teploty. Skrze uhlí přitom proudí vzduch nebo kyslík předehříváný na aktuální teplotu topné píčky. Jako parametr náchylnosti vzorku sledovaného uhlí k samovznícení se vyhodnocuje tzv. „crossing point“ – teplota CPT, která odpovídá momentu, kdy teplota uhlí kříží teplotu pece.

Nevýhodou této metody je individuální charakter získaných výsledků, což znamená, že tyto výsledky jsou prakticky neporovnatelné v jiných laboratořích. [12]



Graf 5 Termografický záznam z měření metodou CPT [12]

## 6. Studie CO na Teplárně Karviná

Na teplárně Karviná proběhla na jaře předloňského roku Studie monitoringu CO z hlediska rizik samovznícení uhelné hmoty a ochrany obsluhy firmou IHAS s.r.o. Jedním z hlavních cílů bylo proměřit predispozici k procesu samovzněcování (oxireaktivitu) vzorku černého uhlí metodou pulzní průtokové kalorimetrie (viz výše).

Jako vzorky byla použita tato uhlí a bylo dosaženo následujících výsledků: [14]

### 1) Vzorek uhlí

Originální označení: „Černé uhlí, Důl OKD (24-25 MJ/kg)“

Zkrácené označení dodavatelem: **U1**

### 2) Vzorek uhlí

Originální označení: „DKA, Kopalnia STASZIC RUCH STASZIC; Sortyment MIIA KL. 23 MJ“

Zkrácené označení dodavatelem: **U2**

Tab. 9 Hodnoty oxidačních tepel [14]

Vzorek uhlí	Hodnota $q^{30}$ [J/g]	Kategorie
U1	$0,35 \pm 0,02$	II. Reaktivní uhlí
U2	$1,7 \pm 0,3$	I. Vysoce reaktivní uhlí

Pozn. Obsah vlhkosti uhlí při kalorimetrické zkoušce: U1 = 2,6 %, U2 = 3,5%

Z naměřených výsledku vyplývá, že z hodnocených uhlí je reaktivnější vzorek polského uhlí, které jeví i oproti běžným černým uhlím z OKD až dvojnásobné hodnoty a dá se předpokládat, že u tohoto paliva se mohou vyskytovat častěji samovznětlivé reakce. Z tohoto důvodu bude nutno veškerá opatření směřovat s důrazem na chování tohoto uhlí.

## 7. Ochrana proti výbuchu

Jako zabezpečení proti výbuchu prachu slouží kromě preventivního opatření (omezení vzniku výbušné atmosféry, zahoření paliva, popřípadě inertizace prostředí) ochranné systémy, které výrazně omezují účinky již vzniklého výbuchu.

První je zařízení na odlehčení výbuchu, kdy jsou na plášti technických zařízení umístěny membrány, klapky nebo speciální ventily, které slouží k uvolnění výbuchového tlaku mimo zařízení. Díky tomu je plášť výrazně méně namáhán, než při uzavřené nádobě, a nedochází tedy k destrukci zařízení.

Druhým opatřením je potlačení výbuchu, kdy jsou uvnitř zařízení detekovány projevy výbuchu (plamen či nárůst tlaku). Po vyhodnocení signálu řídicí jednotkou dojde k vpuštění hasiva do systému, čímž dojde k uhašení plamene a zastavení nárůstu tlaku. Celá akce po vnesení hasiva trvá v jednotkách milisekund.

Důležitým prvkem ochrany je také zabránění přenosu výbuchu v potrubí do propojených zařízení. Existují dvě možnosti řešení: chemická bariéra a mechanická uzávěra (zpětné klapky). Princip použití chemické bariéry je velmi podobný systému na potlačení výbuchu, liší se pouze častějším použitím optických detektorů a jiným softwarem řídicí jednotky.

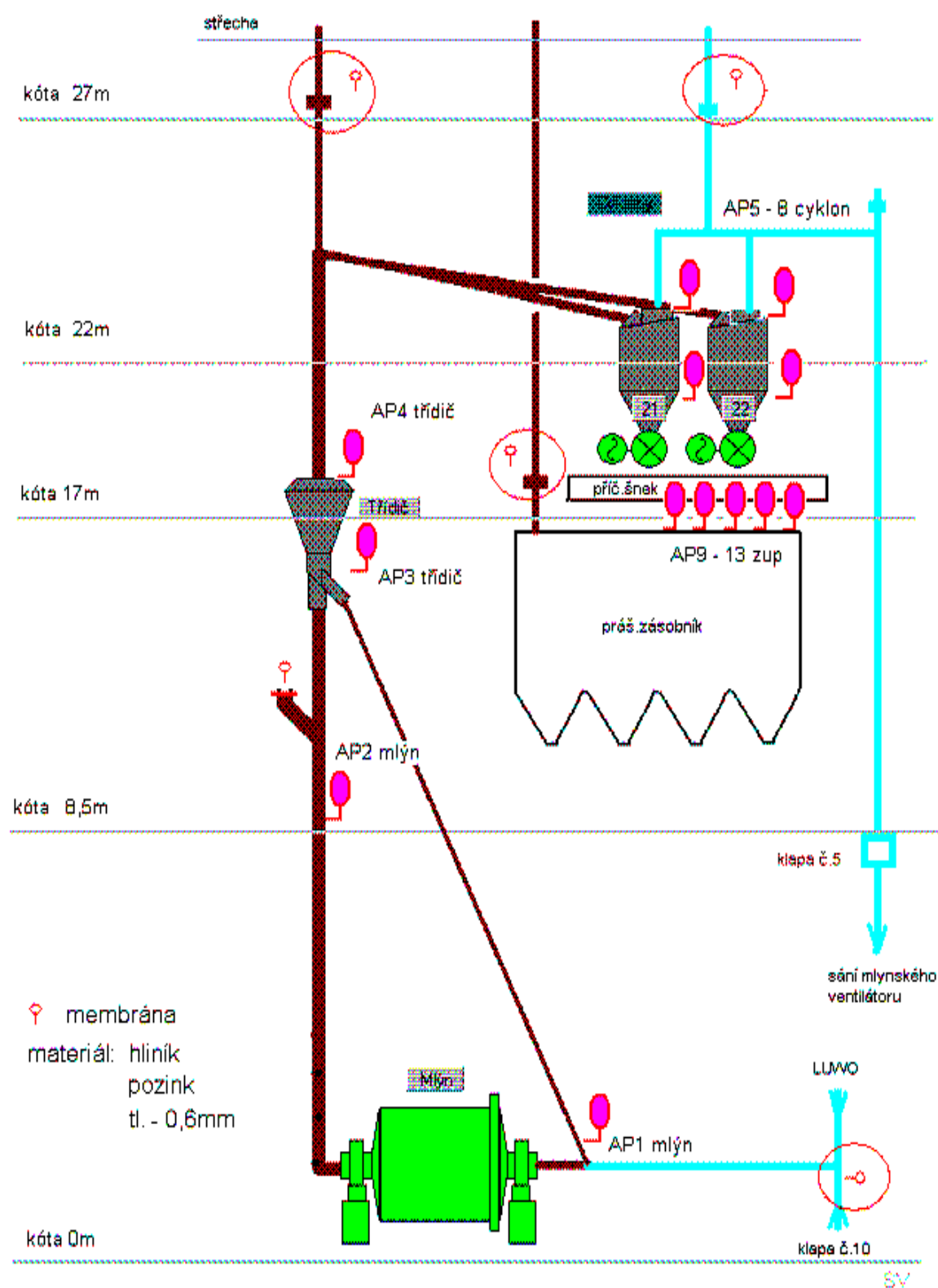
Na mlýnském okruhu TKV jsou nainstalovány membrány, které slouží k uvolnění tlaku při výbuchu média a na všech kotlích je instalován systém HRD. Jedná se o automatické protivýbuchové systémy ANTIDET. Antidet Suppressor je ochranný systém, který se používá na ochranu zařízení a obsluhy před nežádoucími účinky výbuchu prachovzdušných směsí třídy St1 a St2 potlačením výbuchu uvnitř uzavřených zařízení. Antidet Barrier je ochranný systém, který se používá na ochranu zařízení a obsluhy před nežádoucími účinky přenosu výbuchu prachovzdušných směsí třídy St1 a St2 uhašením čela plamene výbuchu uvnitř potrubí.

Systém ANTIDET se skládá minimálně z jedné řídicí jednotky, jednoho tlakového nebo optického snímače exploze a jednoho akčního prvku s hasivem. [8]



Obr. 5 Systém Antidet [8]

## Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná



Obr. 6 Schéma umístění membrán a protivýbuchové ochrany Antidet [8]



## 8. Popis stávajícího problému a navrhované řešení

Proces samovznícení uhelného prášku je obrovské riziko pro bezpečný provoz mlýnských okruhů. V případě zahoření paliva v jakékoliv části mlýnského okruhu hrozí nekontrolovatelný rozvoj šíření plamene s možností následného výbuchu. Největší problémy se samovznícením uhelného prášku na Teplárně Karviná nastávají při náhlé odstávce kotle (např. při poruše), kdy v zásobníku uhelného prášku či v mlýně zůstává určitý objem paliva. Toto palivo již nelze spolehlivě a hlavně bezpečně z těchto lokalit odstranit a tak po nějaké době cca 2 - 3 dnů začne žhnout.

Na teplárně v Karvině jsou největší problémy se zahoříváním paliva v zásobníku uhelného prášku, k samovznícení paliva v mlýně téměř nedochází. Proto je většina řešení problému celé práce věnována právě zásobníkům uhelného prášku mlýnských okruhů.

V následující části práce budou popsány možné řešení, opatření a doporučení, které by se mohly na Teplárně Karviná zavést pro eliminaci zahoření uhelného prášku popřípadě jeho následného bezpečného odstranění ze zásobníku.

Nejlepší prevencí je vždy předcházet této události, tedy mít včasnou informaci o vzniku, začátku procesu samovznícení a následně mít připravené akční zásahy. Samovznícení a tím i zanesení ložisek zahořelé hmoty do zásobníku může mít již původ na skládce paliva nebo může dojít k zahoření paliva už v samotném mlýně.

Při včasné identifikaci ohrožení je nejlepším opatřením takový zásobník v pokud možno nejkratším časovém rozpětí vyprázdnit za neustálého monitoringu a následně před dalším plněním provést důkladnou revizi zásobníku od případných nálepů.

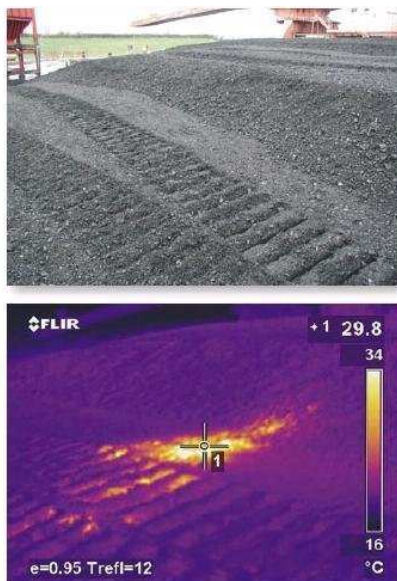
Součástí řešení jsou samozřejmě i nezbytná využitelná opatření k předcházení vzniku jako je např. konstrukce zásobníku, měření koncentrací CO, teplot, možnosti inertizace, atd. Předcházení vzniku je popsáno v samostatné kapitole.

Jako dvě hlavní řešení situace s již započatým procesem samovznícení (na základě měření teplot a koncentrací CO) jsou inertizace zásobníku dusíkem a dále havarijní vyprázdnění zásobníku uhelného prášku pomocí navrženého páteřního rozvodu popřípadě šnekových dopravníků.

## 9. Předcházení vzniku samovznícení na skládce paliva a v mlýně:

Nejzákladnější ochrana uhelného prášku před samovznícením začíná již před procesem mletí a to na počátku dopravní cesty zauhlování, přímo na skládce surového uhlí. Je zde doporučení, aby se povrch skládky uhlí snímal termovizí nebo se provádělo pravidelné měření tyčovými teploměry se záznamem teplot. Tímto jednoduchým procesem se dají odhalit místa s větší teplotou, než je teplota okolí a tudíž i nebezpečná ohniska surového uhlí náchylného k samovznícení. Toto uhlí se musí před zauhlováním přímo na skládce rozhrabat a uhasit. Další možností je hutnění, které má význam v tom, že v hutněné skládce paliva dochází rychle k anaerobizaci – vytěsnění vzduchu, což znamená, že surové palivo je méně náchylné k samovznícení. Dalo by se říci, že se jedná o „válcování“ paliva. V neposlední řadě by se mělo kontrolovat dovážené palivo. Pokud je uhlí zahořelé již ve vagónech, nesmí se zauhlovat.

Na teplárně Karviná se skládka surového paliva dříve snímala termovizí a u českého uhlí z dolu Darkov k problémům se zahoříváním nedocházelo. Avšak u polského uhlí se měření teploty provádělo sondou a zde již k zahořívání docházelo. K uhašení těchto ohnisek se používalo válcování uhlí.



Obr. 7 Termovize [15]

Uhlí ze skládky nebo z vagónů je dopravováno do zásobníků surového uhlí a dále do mlýnských okruhů jednotlivých kotlů.

Zde je uvedeno několik opatření k zabránění samovznícení, zahoření uhlí v samotném mlýně. Především se jedná o dokonalé vymílání paliva po ukončení procesu. Po ukončení procesu mletí se doporučuje pomocí instalace parních trysek (systém BCE), dokonale vyčistit mlýn od nálepu a usazenin paliva. Další možností je v případě rizika požáru, zalití mlýna vodou. S ohledem na následky do další technologie lze jednoznačně doporučit uhašení parou, která zároveň působí jako účinný inertizační prostředek. Po takovém zásahu je nutno provést vyjetí zásobníku, viz dále.

## 10. Tepelný výpočet mlýnice a její inertizace

V této kapitole se pomocí tepelného výpočtu mlýnice určí potřebné množství sušícího média, v tomto případě spalin, na sušení uhlí a následnou inertizaci mlýnského okruhu. Základní tepelná bilance u mlecího zařízení se sestavuje pro 1 kg surového uhlí. Vstupními průřezy pro tepelnou bilanci jsou na straně paliva podavač surového uhlí a na straně sušícího média průřez přírodního potrubí sušícího média do mlýnského okruhu. Jako výstup je uvažován vstupní průřez do mlýnského ventilátoru. Vstupní veličiny jsou značeny indexem ' a výstupní indexem ''.

Výpočty byly provedeny na základě literatury uvedené v seznamu zdrojů. [16]

**Rovnice tepelné bilance:**

$$\begin{aligned}\Sigma q &= q'_{sm} + q_{mech} + q_{fvz} + q_{pal} - q_{výp} - q''_{sm} - q_{pr} - q_5 = 0 \\ q'_{sm} + q_{mech} + q_{fvz} + q_{pal} &= q_{výp} + q''_{sm} + q_{pr} + q_5\end{aligned}\quad (10.1)$$

Z této bilanční rovnice určíme hmotnost sušícího média  $l/h$  na 1 kg surového uhlí.

**Teplo přivedené do mlýnského okruhu na 1 kg surového uhlí:**

**a) citelné teplo sušícího média:**

$$q'_{sm} = \frac{1}{h} \times c \times t' = \frac{1}{h} \times 1,1145 \times 270 = \frac{1}{h} \times 300,92 \frac{kJ}{kg} \quad (10.2)$$

Tab. 10 Měrné tepelné kapacity spalin v závislosti na teplotě [16]

t [°C]	c [kJ/kg*K]
0	1,042
100	1,068
200	1,097
300	1,122

interpolace:

$$c_{270} = 1,097 + \left[ \frac{270-200}{300-200} \times (1,122 - 1,097) \right] = 1,1145 \frac{kJ}{kg \times K} \quad (10.3)$$

$c \left[ \frac{kJ}{kg \times K} \right]$  měrná tepelná kapacita sušícího média (spalin)

$t' [^{\circ}C]$  teplota sušícího média

**b) teplo vznikající při mletí:**

$$q_{mech} = 3,6 \times k_{mech} \times E_{mech} = 3,6 \times 0,7 \times 12 = 30,24 \frac{kJ}{kg} \quad (10.4)$$

---

Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

$E_{mech}[\frac{kWh}{t}]$  měrná mlecí energie; uvažuje se podle typu mlýna, druhu a zrnění paliva:  $E_{mech} \sim 10 - 12 \frac{kWh}{t}$

$k_{mech}[-]$  koeficient určující část mechanické energie přeměněné v teplo

Tab. 11 Koeficient určující část mechanické energie přeměněné v teplo [16]

$k_{mech}$	typ mlýnu
0,6	kladkový, kroužkový
0,7	trubnatý
0,8	tlukadlový, ventilátorový

**c) citelné teplo přisátým vzduchem:**

$$q_{fvz} = \frac{1}{h} \times \Delta\alpha \times c \times t_{vz} = \frac{1}{h} \times 0,25 \times 1,005 \times 30 = \frac{1}{h} \times 7,54 \frac{kJ}{kg} \quad (10.5)$$

$t_{vz}[^{\circ}C]$  teplota chladného vzduchu, uvažuje se  $t_{vz} = 30^{\circ}C$

$c[\frac{kJ}{kg \times K}]$  měrná tepelná kapacita vzduchu, pro  $30^{\circ}C$  je  $c = 1,005 \frac{kJ}{kg \times K}$

$\Delta\alpha[-]$  přisávání chladného vzduchu

Tab. 12 Koeficient určující přisávání chladného vzduchu [16]

$\Delta\alpha$	typ mlýnu
0,1	tlukadlový (podtlakový)
0,2	tlukadlový (podtlakový)
0,2	kladkový (podtlakový)
0,2	trubnatý (sušení vzduchem)
0,25	trubnatý (sušení spaliny)
0,3	ventilátorový

**d) citelné teplo paliva:**

$$q_{pal} = c_u \times t_u = 1,4 \times 10 = 14 \frac{kJ}{kg} \quad (10.6)$$

$$\begin{aligned} c_u &= 4,182 \times W^r + (1 - W^r) \times c_{su} \\ &= 4,182 \times 0,0997 + (1 - 0,0997) \times 1,087 = 1,4 \frac{kJ}{kg \times K} \end{aligned} \quad (10.7)$$

---

Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

$W^r [-]$	obsah vody v surovém palivu
$c_u [\frac{kJ}{kg \times K}]$	měrná tepelná kapacita uhlí závislá na obsahu $W^r$
$t_u [^{\circ}C]$	teplota uhlí, uvažuje se $t_u = 10^{\circ}C$
$c_{su} [\frac{kJ}{kg \times K}]$	měrná tepelná kapacita sušiny uhlí

Tab. 13 Měrné tepelné kapacity sušiny vybraných paliv [16]

druh paliva	$c_{su} [kJ/kg \cdot K]$
antracit	0,920
černé uhlí	1,087
hnědé uhlí	1,129
rašelina	1,129
živičná břidlice	0,878

**Teplo vynaložené v mlýnici na sušení a odváděné z mlýna:****a) teplo potřebné na odpaření vlhkosti paliva:**

$$q_{výp} = \Delta W \times (2490 + 1,96 \times t'') = 0,0813 \times (2490 + 1,96 \times 100) \quad (10.8)$$

$$= 218,37 \frac{kJ}{kg}$$

$$\Delta W = \frac{W^r - W^{pr}}{100 - W^{pr}} = \frac{9,97 - 2}{100 - 2} = 0,0813 \frac{kg}{kg} \quad (10.9)$$

$$t'' = t'' - \Delta t = 110 - 10 = 100^{\circ}C \quad (10.10)$$

$\Delta W [\frac{kg}{kg}]$	hmotnost odpařené vlhkosti z 1 kg surového uhlí
$W^r [\%]$	vlhkost surového uhlí
$W^{pr} [\%]$	vlhkost prášku
$t'' [^{\circ}C]$	teplota sušícího média
$\Delta t [^{\circ}C]$	ochlazení plynu v mlýnském okruhu, pro okruh se zásobníkem prášku se uvažuje $\Delta t = 10^{\circ}C$

---

Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

**b) teplo odváděné sušícím médiem (bez odpařené vlhkosti):**

$$q''_{sm} = \frac{1}{h} \times (1 + \Delta\alpha) \times c \times t'' = \frac{1}{h} \times (1 + 0,25) \times 1,0709 \times 11 = \frac{1}{h} \times 147,25 \frac{kJ}{kg} \quad (10.11)$$

interpolace:

$$c_{110} = 1,068 + \left[ \frac{110-100}{200-100} \times (1,097 - 1,068) \right] = 1,0709 \frac{kJ}{kg \times K} \quad (10.12)$$

**c) teplo odváděné práškem:**

$$\begin{aligned} q_{pr} &= \frac{100 - W^r}{100} \times (c_{su} + c_w \times \frac{W^{pr}}{100 - W^{pr}} \times (t'' - t_u)) \\ &= \frac{100 - 9,97}{100} \times (1,087 + 4,193 \times \frac{2}{100 - 2}) \times (110 - 10) \\ &= 105,57 \frac{kJ}{kg} \end{aligned} \quad (10.13)$$

 $c_w [\frac{kJ}{kg \times K}]$  měrná tepelná kapacita vody při 10 °C
**d) ztráta tepla do okolí:**

$$q_5 = \frac{3,6 \times Q_5}{M_u} = \frac{3,6 \times 100}{20} = 18 \frac{kJ}{kg} \quad (10.14)$$

 $M_u [\frac{t}{h}]$  výkon mlýna

 $Q_5 [kW]$  ztráta tepla do okolí jednotlivých typů mlýnů, dle jejich velikosti a typu uhlí

Tab. 14 Ztráta tepla do okolí [16]

typ mlýnu	$Q_5 [kW]$
trubnatý	20 – 140
tlukadlový	4,6 – 46
ventilátorový	4,6 – 20
kladkový, kroužkový	15 – 27

**Rovnice tepelné bilance:**

$$q'_{sm} + q_{mech} + q_{fvz} + q_{pal} = q_{výp} + q''_{sm} + q_{pr} + q_5 \quad (10.1)$$

$$300,92 \times \frac{1}{h} + 30,24 + 7,44 \times \frac{1}{h} + 14 = 218,37 + 147,25 \times \frac{1}{h} + 105,57 + 18$$

---

Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

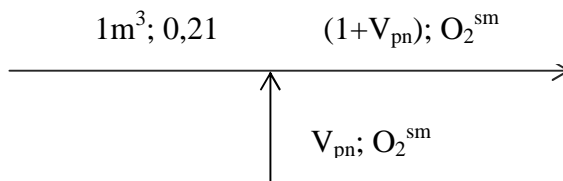
---

$$\frac{1}{h} = 1,85 \frac{kg}{kg_{su}}$$

Tepelný výpočet mlýnice ukazuje, že na sušení 1 kg surového uhlí je potřeba 1,85 kg spalin.

**Inertizace sušícího média spalinami:**

Balance



Tato balance řeší potřebné množství inertizujícího média (v tomto případě spalin) na 1 m³ sušícího vzduchu. Z důvodu absence monitorování koncentrace kyslíku ve spalinách na Teplárně Karviná je uvedena zmíněná koncentrace, jako teoretická hodnota 6 %. Je požadováno, aby výsledná koncentrace směsi vzduchu a spalin byla 8 %.

$$1 \times 0,21 + V_{pn} \times O_2^{pn} = (1 + V_{pn}) \times O_2^{sm} \quad (10.15)$$

$$O_2^{sm} = \frac{0,21 + O_2^{pn} \times V_{pn}}{1 + V_{pn}}$$

$$V_{pn} = \frac{0,21 - O_2^{sm}}{O_2^{sm} - O_2^{pn}} = \frac{0,21 - 0,08}{0,08 - 0,06} = 6,5 \text{ m}^3$$

$V_{pn}[\text{m}^3]$       objem inertizujícího plynu (spalin)

$O_2^{pn}[-]$       koncentrace kyslíku v inertizujícím plynu

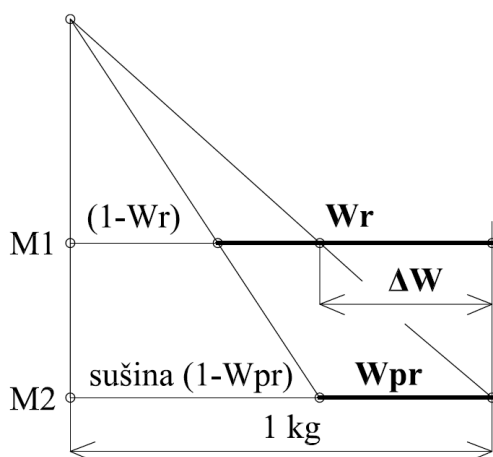
$O_2^{sm}[-]$       koncentrace kyslíku ve směsi (vzduch + spaliny)

Z výpočtu vyplývá, že na 1 m³ sušícího vzduchu je potřeba 6,5 m³ spalin. Tyto vzorce se vztahují na míšení suchého vzduchu a suchých spalin bez ohledu na vlhkost paliva. Při odpaření vlhkosti z paliva se snižuje koncentrace kyslíku a tím pádem i riziko výbuchu.

**Sušení uhlí – inertizace odpařenou vodou (vodní parou):**

Sušení paliva probíhá na Teplárně Karviná přímo při mletí uhlí v mlýně, není předřazena suška. Při tomto ději se voda obsažená v surovém uhlí odpařuje, vzniká vodní pára, která napomáhá vytvoření podmínek inertizace. Balance se určuje pro 1 kg surového uhlí. Průměrná hodnota vlhkosti paliva před mletí je 9,97 %. Vlhkost namletého uhelného prášku se na teplárně neměří. V této práci se výsledná vlhkost po mletí předpokládá jako hodnota 2 %.

## Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

Obr. 8 Určení  $\Delta W$  [5]

- množství uhlí po sušení:

$$M_2 = M_1 \times \left(1 - \frac{W^r - W^{pr}}{100 - W^{pr}}\right) = 1 \times \left(1 - \frac{9,97 - 2}{100 - 2}\right) = 0,919 \text{ kg} \quad (10.16)$$

- celkové množství vysušené vody ve formě vodní páry:

$$M_W = M_1 \times \frac{W^r - W^{pr}}{100 - W^{pr}} = 1 \times \frac{9,97 - 2}{100 - 2} = 0,081 \frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{paliva}}} \quad (10.17)$$

- objem vodní páry z 1 kg paliva:

$$\Delta W' = \frac{W^r - W^{pr}}{100 - W^{pr}} \times \frac{1}{\rho_p} = \frac{9,97 - 2}{100 - 2} \times \frac{1}{0,804} = 0,101 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{pal}}} \quad (10.18)$$

$$\rho_p = \frac{M_r}{V_m} = \frac{18}{22,4} = 0,804 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (10.19)$$

$M_r$  [–] molekulová hmotnost vodní páry

$V_m$  [ $\frac{\text{dm}^3}{\text{mol}}$ ] molární objem vodní páry

$\rho_p$  [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ] hustota vodní páry

- objem vodní páry na 1 m<sup>3</sup> sušícího vzduchu:

$$\Delta W'' = h \times \frac{W^r - W^{pr}}{100 - W^{pr}} \times \frac{\rho_{vz}}{\rho_p} = 0,54 \times \frac{9,97 - 2}{100 - 2} \times \frac{1,26}{0,804} = 0,069 \frac{\text{m}^3}{\text{m}_{\text{suš.vz.}}^3} \quad (10.20)$$



## Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

$$h = \left(\frac{1}{h}\right)^{-1} = 1,85^{-1} = 0,54 \frac{kg_{pal}}{kg_{suš.vz.}} \quad (10.21)$$

$h \left[ \frac{kg_{pal}}{kg_{suš.vz.}} \right]$  koncentrace paliva v sušícím vzduchu

$\rho_{vz} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  hustota sušícího vzduchu

- koncentrace kyslíku ve směsi vlivem odpaření vlhkosti:

$$1 \times O_2^{sm} + \Delta W'' \times 0 = (1 + \Delta W'') \times O_2^{sm'} \quad (10.22)$$

$$O_2^{sm'} = \frac{O_2^{sm}}{1 + \Delta W''} = \frac{0,08}{1 + 0,069} = 0,0748 \sim 7,48 \%$$

- vzrůst koncentrace kyslíku na konečnou hodnotu přísátým vzduchem:

$$\begin{array}{c} (1+\Delta W''); \quad (1+\Delta W''+\Delta\alpha); O_2^{sm''} \\ \xrightarrow{\hspace{10em}} \\ \uparrow \Delta\alpha; 0,21 \end{array}$$

$$(1 + \Delta W'') \times O_2^{sm'} + \Delta\alpha \times 0,21 = (1 + \Delta W'' + \Delta\alpha) \times O_2^{sm''} \quad (10.23)$$

$$O_2^{sm''} = \frac{(1 + \Delta W'') \times O_2^{sm'} + 0,21 \times \Delta\alpha}{1 + \Delta W'' + \Delta\alpha} = \frac{(1 + \Delta W'') \times \frac{O_2^{sm}}{1 + \Delta W''} + 0,21 \times \Delta\alpha}{1 + \Delta W'' + \Delta\alpha}$$

$$\begin{aligned} O_2^{sm''} &= \frac{\frac{0,21 + V_{pn} \times O_2^{pn}}{1 + V_{pn}} + 0,21 \times \Delta\alpha}{1 + \Delta W'' + \Delta\alpha} \\ &= \frac{0,21 + V_{pn} \times O_2^{pn} + 0,21 \times \Delta\alpha + V_{pn} \times 0,21 \times \Delta\alpha}{1 + \Delta W'' + \Delta\alpha + V_{pn} + V_{pn} \times \Delta W'' + V_{pn} \times \Delta\alpha} \end{aligned}$$

pozn.: členy  $V_{pn} \times 0,21 \times \Delta\alpha$ ;  $V_{pn} \times \Delta W''$ ;  $V_{pn} \times \Delta\alpha$  vzhledem k jejich hodnotě zanedbáváme

$$\begin{aligned} O_2^{sm''} &= \frac{0,21 \times (1 + \Delta\alpha) + V_{pn} \times O_2^{pn}}{1 + \Delta W'' + \Delta\alpha + V_{pn}} = \frac{0,21 \times (1 + 0,3) + 6,5 \times 0,06}{1 + 0,069 + 0,3 + 6,5} \\ &= 0,0842 \sim 8,42 \% \end{aligned}$$

Výsledná hodnota určuje koncentraci kyslíku ve směsi při uvážení odpařené vlhkosti z paliva, falešného vzduchu a inertních spalín. V uvedeném postupu jsou uvažovány suché spaliny. Ve skutečnosti však spaliny obsahují vodní páru, a proto bude výsledná koncentrace nižší. Předpokládá se, že obsah kyslíku by měl poklesnout pod 8 %.

## 11. Předcházení vzniku samovznícení v zásobníku uhelného prášku

Pokud se nepodaří zabránit rizikům samovznícení již na skládce paliva, popřípadě v mlýně mlýnského okruhu, je potřeba pokusit se předejít samovznícení uhelného prášku přímo v jeho zásobníku.

Především je to udržování prášku v jeho optimální hladině v zásobníku. Z tohoto důvodu se nedoporučuje udržovat max. zásoby prášku v zásobníku a doplňovat až po dosažení minimální hladiny. Na teplárně Karviná by měla být hladina paliva v zásobníku uhelného prášku v rozmezí 320 až 580 cm. Ohniska samovznícení vznikají většinou uprostřed zásobníku a při velkém objemu prášku se riziko samovznícení a případného následujícího výbuchu zvětšuje.

Následující opatření k předcházení vzniku je inertizace zásobníku. Inertizace se provádí za účelem zajištění nevýbušného prostředí. Principem inertizace je zaplnění vnitřního prostoru zásobníku inertizační plynou směsí (dusíku s kyslíkem (max. koncentrace 10%)), resp. minimalizace obsahu kyslíku v daném prostoru. K hašení stačí, aby obsah inertních plynů dosáhl poloviny objemu uzavřeného prostoru. Více o inertizaci pojednává kap. 12.3 a 12.4.

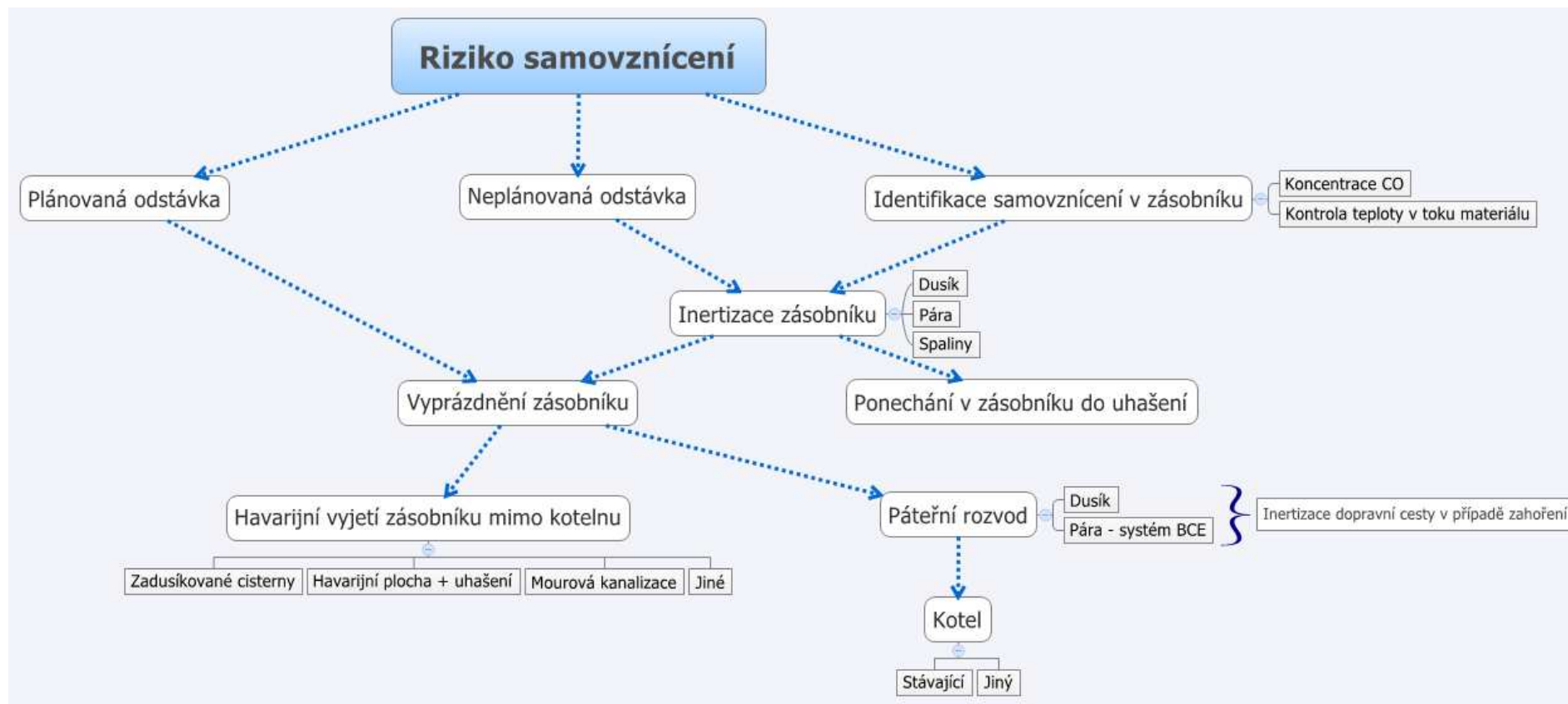
Jako následující ochranu je vhodné uvést konstrukční úpravy zásobníku zabraňující nálepům, jejich následnou kontrolu a odstranění ze stěn zásobníku uhelného prášku. Nálepy jsou další hrozbou pro samovznícení. Předcházet vzniku těchto nežádoucích jevů lze pomocí konstrukčních úprav zásobníku, viz konstrukční úpravy zásobníku v kapitole 12.1.

Je vhodné se zabývat také kontrolou klenbování, což je porucha toku materiálu v zásobníku, projevující se přerušováním kontinuity toku sypké hmoty. Jedná se především o hledání souvislostí mezi vlastnostmi skladovaného materiálu, velikostí výpustného otvoru, tvarem zásobníku a materiálem, ze kterého je zásobník vyroben

Jak již bylo zmíněno, ochrana spočívá v kontrole teploty uhelného prášku v toku materiálu u výpustního otvoru ze zásobníku. Používají se také řetězové teploměry, které jsou umístěny na několika místech řetězu. Tento řetěz se spouští do zásobníku s palivem a v různých výškách je měřena teplota. Ochrana dále spočívá v rychlé identifikaci CO. V tomto případě se nesleduje absolutní hodnota oxidu uhelnatého v zásobníku, ale jeho náhlý nárůst. Proto by mělo být v horní části zásobníku umístěno čidlo zaznamenávající tyto prudké změny oxidu uhelnatého způsobené samovzněcovacím procesem. Dále se doporučuje instalovat do zásobníku jedno odběrové místo kyslíku (jehož by mělo být v zásobníku maximálně 8 %). Díky informacím o poklesu kyslíku a zvýšení koncentrace CO máme spolehlivou informaci o začátku procesu samovznícení. Proto se jeví sledování pouze teploty v zásobníku jako nedostatečné a kvůli riziku výbuchu jako nebezpečné.

V následujícím schématu jsou přehledně zaznamenány možnosti a místa samovznícení, které mají za následek možnost samovznícení uhlí v zásobníku nebo jeho rozvoji a následně i praktické možnosti řešení.

## Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná



Obr. 9 Možná řešení situací při samovznícení paliva v zásobníku uhlého prášku

## 12. Navrhované možnosti řešení

### 12.1 Konstrukční ochrana zásobníku

Toto řešení nebo spíše opatření spočívá v určitých konstrukčních úpravách zásobníku uhelného prášku. Na přiloženém výkresu číslo 1 jsou znázorněny možné konstrukční úpravy zásobníku a dále také již zmíněné opatření proti vzniku samovznícení uhelného prášku.

Jako konstrukční opatření se doporučuje použití železobetonových traverz umístěných napříč zásobníkem. Tato traverza má obdélníkový tvar se stříškou, která zabraňuje nálepům, ve kterých hrozí samovznícení uhelného prášku. Další konstrukční opatření spočívá v zaoblení veškerých rohů zásobníků, kde také dochází k nálepům.

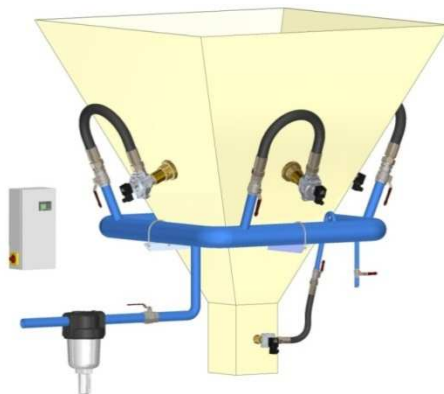
Možné opatření zabraňující nálepům je umístění čeřících desek z porézního materiálu v blízkosti výpustního otvoru, pod které se dmýchá vzduch nebo plyn. Vzduch proniká porézní látkou do styčných ploch prášku, který se spolu se vzduchem stává tekutým. Takto uvolněný prášek plyne k výpustnímu otvoru a jeho „nalepení“ na stěnu zásobníku je zamezeno.

Na výkresu jsou také znázorněna opatření proti samovznícení, jak již bylo zmíněno dříve, a to optimální hladina uhelného prášku a čidla CO a O<sub>2</sub> umístěná v horní části zásobníku. Vhodná místa k měření teploty uhelné hmoty jsou v schématu taktéž znázorněna.

Poslední možnost konstrukčních úprav jsou vzduchová děla umístěná ve spodní části zásobníku. Těmito děly se do uhelného prášku v případě zahoření vpouští dusík (viz kapitola 12.3 Hašení již zahořelého paliva – inertizace zásobníku).

### 12.2 Systém Mosa Solution

Jako poslední opatření před samotným vznikem zahoření uhelného prášku je uveden systém Mosa Solution. Jedná se o řešení netekoucího prášku ze zásobníku a tím pádem eliminace nálepů, které k samovznícení vedou. Na zásobníku uhelného prášku jsou instalovány pulzní trysky Myrlen, které pracují na základě pulzního dávkování vzduchu. Tím je eliminován možný vznik netekoucího materiálu na vnitřních stěnách zásobníku. Tyto pulzní trysky vytvářejí krátké pulzy tlakového vzduchu podél stěny uvnitř zásobníku. Díky vysoké rychlosti tlakového vzduchu jsou schopny narušit s každým pulzem materiál až do průměru 2400 mm. [17]



Obr. 10 Schematické znázornění systému pulzních trysek [17]



Obr. 11 Aplikace rozvodu tlakového vzduchu na betonové stěně zásobníku [17]

### 12.3 Hašení již zahořelého paliva – inertizace zásobníku

Pokud již dojde k zahoření uhelného prášku, je další možností pokusit se prášek přímo v zásobníku uhasit, aniž by byl odváděn mimo zařízení. K hašení se určitě nedoporučuje voda, která aktivuje další ohniska k samovznícení a ani oxid uhličitý, který je na TKV instalován. Známá reakce totiž říká:



Z toho vyplývá, že při reakci uhlí s hasícím oxidem uhličitým vzniká nežádoucí oxid uhelnatý, který nebezpečí výbuchu ještě umocní.

Navrhovaným řešením je místo stávajícího oxidu uhličitého použití dusíku.

Existují čtyři uznávané metody inertizace systému:

1. Inertizace tlakováním:

Při této metodě se v systému zvýší tlak inertním plynem a poté je uvolněn zpět na atmosférický tlak. Tyto cykly se opakují až do dosažení požadované koncentrace kyslíku. Tato metoda je vhodná pouze pro systémy, ve kterých může být zvýšen tlak.

2. Inertizace vakuováním:

Metoda je podobná inertizaci tlakováním, s tím rozdílem, že se v systému tlak snižuje a vakuum se uvolňuje doplněním inertního plynu. Vhodné pouze pro systémy, které vydrží vakuum, nikoliv však tlak.

3. Inertizace proplachováním:

Při této metodě se v jednom místě systému přivádí inertní plyn a zároveň se v dalším místě vzdáleném od místa vstupu plyn vypouští. Tato metoda je vhodná pro systémy, které nevydrží podtlak ani přetlak a dále pro rozvětvené systémy, jako potrubí, ve kterých dochází k špatnému promíchávání přiváděného plynu. Předpokládá se dokonalé míchání vzduchu a inertního plynu v systému.

---

Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

4. Inertizace vytlačováním:

Metoda je založena na velkém rozdílu mezi hustotou inertního plynu a nahrazovaného vzduchu. Vhodné pro speciální situace, kdy se předpokládá špatné míchání. [18]

Pro podmínky teplárny v Karviné se jako možné způsoby inertizace jeví inertizovat zásobník tlakováním nebo proplachováním pomocí inertního dusíku. Dle normy ČSN 38 9683 je uveden následující výpočet.

*Rovnice pro inertizaci tlakováním:*

$$C_n = C_i + (C_o - C_i) \times \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^n \quad (12.3.2)$$

$C_n$  [%]      koncentrace kyslíku po  $n$  pročištění

$C_i$  [%]      koncentrace kyslíku v inertním plynu

$C_o$  [%]      počáteční koncentrace kyslíku

$p_1$  [bar]      nižší tlak při pročištění

$p_2$  [bar]      vyšší tlak při pročištění

$n$  [–]      počet cyklů natlakování/uvolnění

$$n = \frac{\log \left( \frac{C_n - C_i}{C_o - C_i} \right)}{\log \left( \frac{p_1}{p_2} \right)} = \frac{\log \left( \frac{8-1}{21-1} \right)}{\log \left( \frac{0+1}{3+1} \right)} = 1,74 \sim 2 \text{ cykly} \quad (12.3.3)$$

Při důkladném promíchání je nutné použití alespoň dvou cyklů. Při požadavku 8 % obsahu kyslíku v zásobníku a skutečnosti, že inertizující dusík obsahuje 1 % kyslíku je tato podmínka splněna.

Je-li znám počet pročištění, je možné vypočítat minimální požadovaný poměr tlaků (tj. horní absolutní přetlak/dolní absolutní tlak).

$$R = \left( \frac{C_o - C_i}{C_n - C_i} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{21 - 1}{8 - 1} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,69 \quad (12.3.4)$$

*Rovnice pro inertizaci proplachováním:*

Při této metodě by se využilo instalace tlakových děl ve spodní části zásobníku pomocí, kterých by se dusík do systému vpouštěl.

$$t = F \times \frac{V}{Q} \times \ln \left( \frac{C_i - C_o}{C_i - C_f} \right) = 2 \times \frac{30}{60} \times \ln \left( \frac{1 - 21}{1 - 8} \right) = 1,05 \text{ hod} \sim 63 \text{ min} \quad (12.3.5)$$

---

Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

$t$ [hod]	doba potřebná pro propláchnutí
$F$ [–]	bezpečnostní koeficient, pro nádoby bez odboček: $F = 2$
$V$ [ $m^3$ ]	objem zásobníku
$Q$ [ $\frac{m^3}{hod}$ ]	rychlost průtoku inertního plynu
$C_f$ [%]	koncentrace kyslíku po propláchnutí průtokem
$C_o$ [%]	počáteční koncentrace kyslíku
$C_i$ [%]	koncentrace kyslíku v inertním plynu

Pokud známe přibližný čas potřebný k propláchnutí zásobníku k dosažení inertní atmosféry, můžeme dopočítat potřebný průtok se změněnou koncentrací kyslíku v inertizujícím dusíku:

$$Q = F \times \frac{V}{t} \times \ln\left(\frac{C_i - C_o}{C_i - C_f}\right) = 2 \times \frac{30}{1,05} \times \ln\left(\frac{2 - 21}{2 - 8}\right) = 65,87 \frac{m^3}{hod} \quad (12.3.6)$$

## 12.4 Inertizace mlýnského okruhu

Další možností jak úspěšně zabránit zahoření paliva a následného samovznícení je inertizace celého mlýnského okruhu. Pokud pomineme fakt, že palivo prochází inertizačním procesem při mletí paliva a následném sušení uhlénoho prášku pomocí sušícího média, je možné provést inertizaci mlýnského okruhu zvláštním inertizačním médiem.

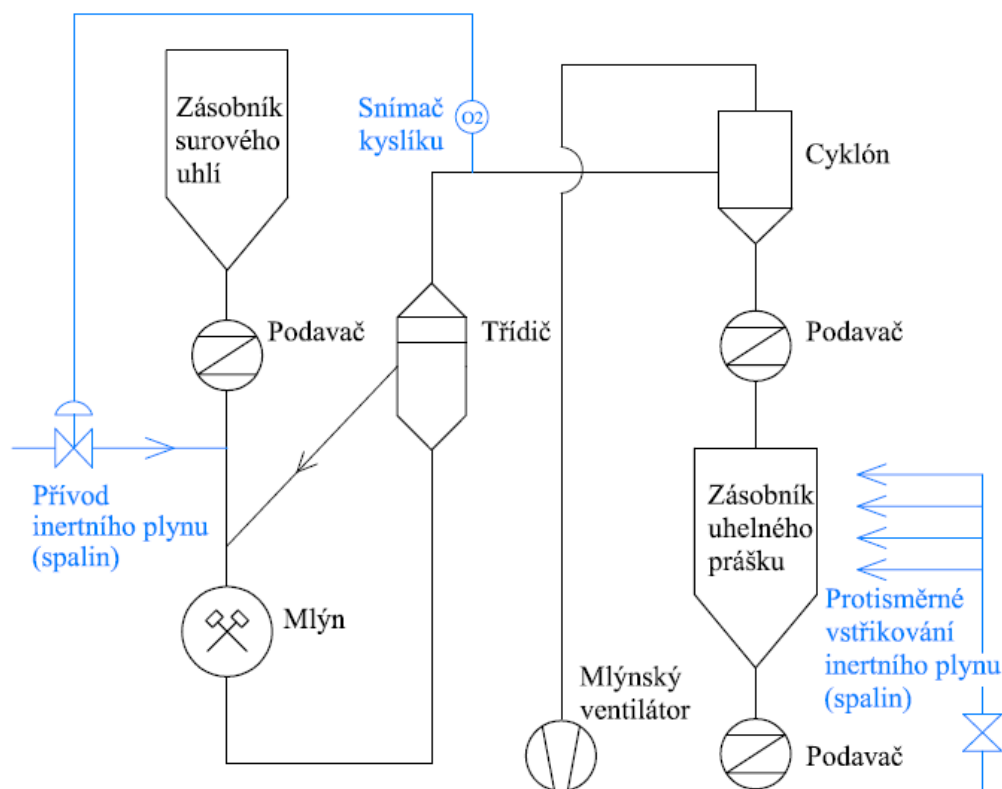
Pro tak objemná zařízení jako jsou mlýnské okruhy elektráren a tepláren připadá v úvahu inertizace pouze spaliny popřípadě parou. Dusík, případně další vzácné plyny jako argon jsou pro daný účel extrémně provozně drahou variantou.

K inertizaci energetických provozů se proto používají levnější média, již zmíněné spaliny a pára. Inertizace parou má však řadu nevýhod, jako kondenzace a koroze. Proto se doporučuje použití spalin z kotle, které se odebírají za filtrem (mají teplotu okolo 160 °C a jsou již odprášené).

U spalin je třeba hlídat limitní obsah kyslíku (nejčastěji zdvojenou kyslíkovou sondou). Velkou nevýhodou spalin je jejich chemická agresivita – při poklesu teploty pod rosný bod dochází ke kondenzaci spalin a vlivem obsahu oxidů síry (SO<sub>x</sub>) dochází k tvorbě kyseliny sírové. Při použití inertizace spaliny je proto třeba vyřešit celou řadu problémů s izolací a zabránění rosení.

Na následujícím obrázku je schematicky znázorněn mlýnský okruh kotle na Teplárně Karviná a řešení přívodu spalin jako prostředek inertizace.

# Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná



Obr. 12 Mlýnský okruh TKV a jeho inertizace spaliny

## 12.5 Zrušení zásobníku uhelného prášku

Krajním řešením problému může být také zrušení zásobníku uhelného prášku. Tento návrh využili v Sokolovské uhelné na teplárně Vřesová. Jedná se sice o teplárnu využívající hnědé uhlí, nicméně i u spalování černého uhlí je to možné. Na této teplárně problém s nalepováním a zahoříváním uhelného prášku vyřešili zrušením zásobníku. Tím by byl namletý prášek přes turniket pod cyklonem rovnou zaveden do směšovacího kusu a dále primárním vzduchem unášen do práškových hořáků.

Toto řešení je však opravdu pouze teoretické, určitě se nevyplatí rekonstrukce stávajícího mlýnského okruhu. Návrh by byl pouze možný při investici nových spalovacích zařízení.

## 12.6 Havarijní výpusť ze zásobníku prášku přes čajník

Tento návrh byl v roce 2010 navrhován na teplárně Přerov. Navrhované řešení mělo umožnit vyprázdnění zásobníků buď do potrubí prášku (kotle) nebo nouzové vyprázdnění přes splavovací potrubí do čajníku. Realizací se minimalizuje nebezpečí zahoření prášku v zásobnících, případně riziko výbuchu v kotelně.

Na výstupní přírubu podavačů prášku jsou namontovány klapky, které přestavením listu změni směr toku prášku. Na tyto klapky jsou namontovány Y-kusy, které svedou výstupy ze dvou klapek do jednoho výstupního potrubí připojeného k čajníku.

Každý pár čajníků je připojen na jednu větev výstupního potrubí. Obě větve potrubí jsou svedeny do přízemí, kde jsou spojeny spojovacím kusem do jednoho společného svodu směsi prášku s vodou. Tento svod je pak zaústěn do stávajícího struskovodního kanálu.

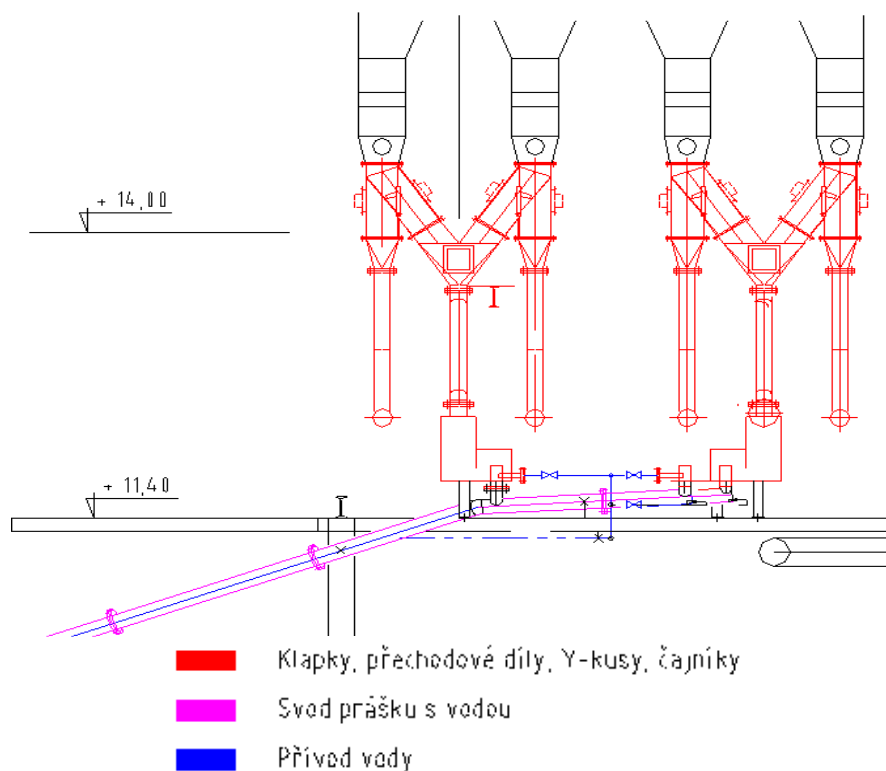


### Návrh zhasení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

Ocelové potrubí vody od místa napojení ze stávajícího přívodu vody nad splavovacím žlabem je přivedeno k čajníkům na společných konzolách s novým svodem větve od zásobníku prášku. Před zaústěním do páru čajníků je z potrubí provedena odbočka na oplachovací trysku, která je umístěna na začátku svodu pod čajníky. Tryska slouží ke splavování případných usazenin pod čajníky. Odbočka pro trysku je osazena kulovým kohoutem. Vstupní hrdla vody do čajníků jsou osazena rovněž kulovými kohouty. [19]



Obr. 13 Pohled na výsypky [19]



Obr. 14 Výpusť ze zásobníku uhlého prášku přes čajník [19]

## 12.7 Řešení havarijní situace

Pokud všechna předchozí opatření proti vzniku samovznícení selžou a k zahoření uhelného prášku dojde, je vedle uhašení vznikajícího požáru pomocí inertního plynu jediným řešením vyprázdnění (vyjetí) zásobníku.

Existuje-li možnost zahořený uhelný prášek spálit přímo v kotli, je to nejlepší varianta (například při příznivé koncentraci CO, kdy nehrozí riziko výbuchu). Havarijní vyprazdňování se provádí z důvodu neočekávané odstávky kotle, například při poruše. V tomto případě se uhelný prášek může odvést dopravní cestou do jiného kotle nebo mimo kotelnu.

Dle schématu ze str. 45 existují několik variant kam uhelný prášek odvézt:

- Havarijní plocha mimo kotelnu
- Cisterny s N<sub>2</sub>
- Stávající, popřípadě jiný kotel

Jako dopravní cestu můžeme použít tato zařízení:

- Japonky
- Čajník, mourová kanalizace
- Kruhové šnekové dopravníky
- Pseudoprava + mlžení do potrubí (nutné inertní prostředí)

### 12.7.1 Havarijní plocha mimo kotelnu

Dle dostupných informací se na TKV při havarijním vyprazdňování zásobníku dříve využívalo tzv. *japonek*. Uhelný prášek se pomocí těchto vozíků odvážel na určené místo, kde došlo k jeho uhašení. Nicméně tato varianta je z hlediska rizika výbuchu kvůli přítomnosti kyslíku nepřijatelná. Jsou známy případy, kdy takovouto manipulací došlo k tragickým událostem (teplárna Špitálka).



Obr. 15 Výbuch kotelný teplárny Špitálka [20]

## Návrh zhasení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

Další možností je již zmíněný návrh řešení samovznícení uhelného prášku na teplárně v Přerově. Jedná se o instalaci *čajníků* na výsypky zásobníků uhelného prášku a vybudování *mourové kanalizace*. Na Teplárně Karviná by bylo nutné, kromě přívodu vody, vybudování struskovodního kanálu vedoucího od zásobníků uhelného prášku až do přízemí kotelny, kde by došlo k uhašení prášku. Dalším případným problémem je riziko, zda voda místo úspěšného uhašení ohnisek zahoření, naopak nenapomáhá samovznícení. Je dokázané, že například při zalití mlýna vodou nehrozí riziko výbuchu, na druhou stranu jsou však známy případy, kdy voda s uhelným práškem tvoří výbušnou směs.

**12.7.2 Cisterny s dusíkem – šnekový dopravník**

Jako přívětivá možnost řešení problému se zahořeným uhelným práškem se jeví instalace kruhových šnekových dopravníků nad komůrkové podavače. Pomocí tohoto dopravníku by bylo možné při poruše kotle vyprázdnit zásobník uhelného prášku do připravené vzduchotěsné cisterny (viz výkres č. 2). V případě potřeby by bylo možné do cisterny vpustit dusík jako prostředek inertizace. V následujícím odstavci bude popsán provoz s takto upravenými výsypkami zásobníku uhelného prášku.

Při běžném provozu kotle musí být zajištěno, aby uhelný prášek procházel bez záchytů a nálepů skrz nainstalovaný kruhový šnekový dopravník. Je tedy nutné, aby byl dopravník ve spodní části uzavíratelný. Naopak při havarijním stavu musí být spodní část dokonale uzavřena a všechny prášek odveden do připravených cisteren. Tyto cisterny by se přistavily pod výpustní konec šnekového dopravníku a zabránilo by se vnikání vzduchu. Pro manipulaci s cisternami je navrženo vybudování kolejiště napříč kotelnou TKV.

Jeden zásobník uhelného prášku pojme maximálně  $30 \text{ m}^3$  paliva. Proto je nutné počítat s rizikem maximálního objemu zahořelého prášku a jeho nutnosti vypuštění do připravené cisterny. Na druhou stranu je velmi nepravděpodobné, že k poruše kotle dojde zrovna ve chvíli, kdy je zásobník uhelného prášku plný. Proti návrhu cisterny o objemu  $30 \text{ m}^3$  stojí především velké rozměry a špatná manipulovatelnost. Je proto navrženo, aby cisterna měla například do  $10 \text{ m}^3$  a v záloze byly připraveny dvě náhradní.

Uhelný prášek v cisterně by byl dále buďto uhašen a vrácen zpět do zásobníku nebo by byl odvezen mimo kotelnu na určité místo, kde by došlo k jeho uhašení a zlikvidování.



Obr. 16 Šnekový dopravník [21]

V kotelně teplárny Karviná jsou celkem čtyři zásobníky uhelného prášku, každý se čtyřmi výsypkami. Podle tohoto návrhu by bylo nejlepším řešením instalovat šnekové dopravníky na všechny čtyři výsypky. Celkem by tedy bylo nutné pořídit 16 těchto dopravníků. Kvůli vysoké pořizovací investici je navrženo umístit šnekové dopravníky pouze na prostřední dvě

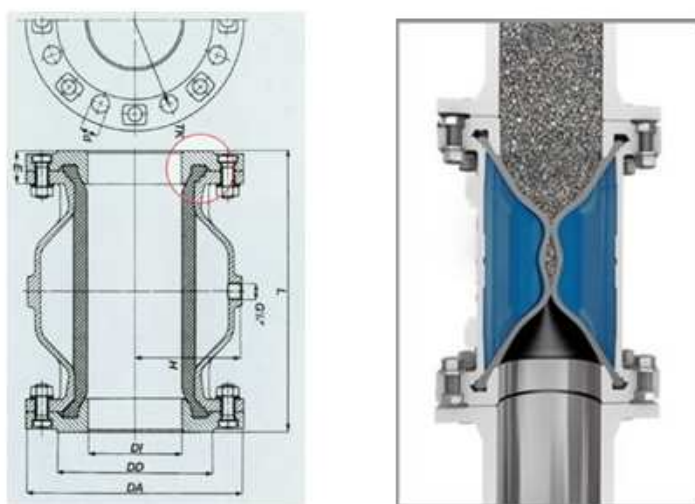
## Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

výsypky. (viz výkres 2) Uhelný prášek ze zásobníku by byl odveden do připravených cisteren těmito dvěma dopravníky. Pokud by existovalo riziko, že by prášek zůstal v rozích zásobníku, je nutné ho pomocí dostupných prostředků zmíněných v předešlé části práce odstranit.

### 12.7.3 Páteční rozvod – pseudoprava

Po konzultaci se zaměstnanci Dalkie se jako nejvhodnější možnost pro podmínky karvinské teplárny jeví navrhnout páteční rozvod, který spojí všechny čtyři zásobníky uhelného prášku, a pomocí kterého bude možné uhelný prášek odvést do jiného kotle (přímo do práškovodu). Tento páteční rozvod by se stal preventivním opatřením proti zahoření uhelného prášku. Této cesty by se využilo, pokud by již nešel uhelný prášek ze zásobníku dostat běžným způsobem. Následovalo by řešení popsané níže.

Tento návrh spočívá v instalaci pneumatických uzavíracích ventilů vhodných do výbušného prostředí nad komůrkovými podavači uhelného prášku. Uzavíracím prvkem je vnitřní pružná, stlačitelná manžeta, která je upevněná v kovovém tělese ventilu. Pomocí tlaku vzduchu přiváděného do tělesa ventilu se manžeta stlačuje, a ventil se uzavírá. Tím se přeruší tok materiálu v potrubí.



Obr. 17 Uzavírací pneumatické ventily [22]

Při využití tohoto řešení je nutná instalace zmíněných uzavíracích ventilů nad komůrkové podavače všech výsypek zásobníku uhelného prášku. Dále bude vedle uzavíracího ventilu navrženo potrubí s dalším takovým ventilem ústícím do navrhovaného pátečního rozvodu, který spojí všechny čtyři zásobníky uhelného prášku vzdálené od sebe přibližně 10 metrů. Potrubí pátečního rozvodu by nemělo přesáhnout vnitřní průměr o velikosti 100 mm. Tento údaj zaručuje zamezení nebezpečí šíření výbuchu. Výstupem z potrubí pátečního rozvodu bude opět uzavírací ventil umístěný na práškovodech, které vedou přímo do jednotlivých kotlů.

Jako dopravní médium bude použit vzduch z připojené stávající kompresorové stanice. Výstup z této stanice je zajištěn na 6 a 4 bar. V případě rizika zahoření prášku v pátečním rozvodu se jako inertizační prostředek doporučuje mlžení do potrubí popřípadě instalace protivýbuchového systému Antidet Barrier.

V následujícím odstavci bude popsán provoz s takto upravenými výsypkami zásobníku uhelného prášku.

---

Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

Při běžném provozu budou instalované uzavírací ventily otevřeny a uhelný prášek skrz tyto ventily bude procházet. V případě poruchy nebo odstávky kotle budou hlavní ventily uzavřeny a pomocí menších otevřených ventilů instalovaných jako vstup do páteřního rozvodu bude prášek odveden do sousedního kotle (vstup do práškovodu opět pomocí instalovaného uzavíracího ventilu). (výkres 3)

Celkový počet hlavních ventilů, stejně jako ventilů ústících do páteřního rozvodu, bude 16. V krajním případě je opět možnost, jako u řešení se šnekovými dopravníky, instalace ventilů pouze na prostředí dvě výsypky každého ze zásobníků uhelného prášku. Jako vstup do práškovodu sousedního kotle je již zapotřebí pouze jeden popřípadě dva ventily, které uhelný prášek dopravovaný skrz páteřní rozvod, do jednoho z práškovodů vpustí.

## Závěr

Hlavním cílem diplomové práce s názvem Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná bylo navrhnout řešení, jak si s problémem samovzněcování uhelné hmoty co nejefektivněji poradit. V úvodu práce je stručně popsáno spalovací zařízení, zauhlovací cesty a mlýnský okruh spolu se zásobníkem uhelného prášku, kde k zahořívání paliva dochází nejčastěji. Proto se největší pozornost při řešení problému věnovala právě těmto zásobníkům.

Při zmínění používaného paliva na teplárně Karviná byla velká část práce věnována fenoménu samovzněcování uhelné hmoty – proč vlastně k samovzněcování dochází. Byly popsány rozdíly mezi nealterovanými typy a oxidačně alterovanými typy uhlí. Důležitým procesem při zkoumání vlastností uhlí je indikace procesu vlastního samovzněcování. Opět byly popsány nejužívanější metody, které se ve světě využívají.

Další částí práce bylo popsání stávajících ochranných opatření proti výbuchu, které jsou na Teplárně Karviná zavedena.

Stěžejní část práce se přímo věnuje vlastnímu problému zahořívání uhelného prášku v jeho zásobníku. K zahořívání paliva dochází nejčastěji při neočekávané odstávce kotle, kdy se prášek již nedá ze zásobníku spolehlivě a bezpečně odvést. Prvním a nejdůležitějším opatřením proti vzniku zahoření je včasná identifikace procesu samovznícení a jeho následné řešení. Schéma (viz obr. 9 ze strany 45) ukazuje možnosti řešení při riziku samovznícení paliva. Je rozdíl, pokud se jedná o plánovanou odstávku kotle, kdy je možnost veškerý prášek ze zásobníku odvést, ať už mimo kotelnu nebo do kotle. Při neplánované odstávce, stejně jako při identifikaci procesu samovzněcování (např. koncentrace CO) je nutné zásobník nejprve inertizovat (dusík, pára, spaliny). Poté je možné prášek v zásobníku ponechat nebo vyprázdnit stejnými způsoby jako u plánované odstávky).

Jak již bylo zmíněno, nejdůležitější ochranou proti samovznícení je jeho včasná identifikace, která začíná již na skládce paliva (monitoring termovizí). Nejdůležitějšími úkony, které lze při monitorování zásobníku uhelného prášku provádět jsou: udržování optimální hladiny uhelného prášku, kontrola nálepů a klenbování, hlídání teploty v toku materiálu a monitoring koncentrace oxidu uhelnatého spolu s kyslíkem. Proti vzniku samovznícení také pomáhají určité konstrukční úpravy zásobníku.

Pokud již dojde k zahoření paliva, je možné ho přímo v zásobníku uhelného prášku uhasit pomocí vzduchových děl, které by zespodu zásobníku vháněly dovnitř dusík. Poslední možností co se zahořeným práškem je provést je jeho havarijní vyprázdnění.

Nejvhodnějším řešením je vybudování páteřního rozvodu, který propojí jednotlivé zásobníky uhelného prášku a v případě potřeby bude prášek odveden do sousedního kotle. Jako možný způsob jak toho dosáhnout je nutná instalace uzavíracích ventilů spolu s přívodem vzduchu ze stávající kompresorové stanice a vybudování potrubí přes celou kotelnu, které uhelný prášek bude dopravovat. Další možností je uhelný prášek ze zásobníku dopravovat do připravených vzduchotěsných cisteren pomocí kruhových šnekových dopravníků.

Odhadnut návratnost investice je téměř nemožné, nicméně tímto řešením se především zabránilo riziku výbuchu uhelného prášku, jehož následky mohou být ničivé jak z hlediska zařízení, tak zdraví zaměstnanců.

## Použité informační zdroje

- [1] WIESNER, František. *Práškové topení: určeno konstruktérům a technikům při provozu parních kotlů a různých průmyslových pecí spalujících uhelný prášek*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1956, 505s.
- [2] ČERNÝ, Václav. *Parní kotle a spalovací zařízení*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975, 526 s.
- [3] DOLEŽAL, Richard. *Kotle a spalovací zařízení*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1965, 422 s.
- [4] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 858 s.
- [5] ČERNÝ, Václav. *Mletí a sušení uhlí: (Příprava uhlí pro prášková ohniště)*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1976, 278 s.
- [6] TRZYNIECKI, Miroslav. DALKIA ČESKÁ REPUBLIKA, a.s. *Místní provozní předpis: Obsluha kotlů 1, 2, 3 a 4*. Karviná, 2007.
- [7] HLINKA, Břetislav. DALKIA ČESKÁ REPUBLIKA, a.s. *Místní provozní předpis: Zauhlování*. Karviná, 2012.
- [8] PLESNÍK, Milan. DALKIA ČESKÁ REPUBLIKA, a.s. *Místní provozní předpis: Dokumentace o ochraně před výbuchem*. Karviná, 2008.
- [9] KAJURA, Waldemar. DALKIA ČESKÁ REPUBLIKA, a.s. *Místní provozní předpis: Stabilní zásobníky na sypké hmoty*. Karviná, 2010.
- [10] ŠEVELOVÁ, Kamila, Kamil STÁREK, Ivo BERKA, Jan HEROSCH a Petr SALVET. *Parní kotle*. 1. vyd. Ostrava, 2007, 244 s.
- [11] KÓL, Přemysl. Spalování tuhých paliv. In: <http://spalovaci-procesy.wz.cz/> [online]. 2011 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://spalovaci-procesy.wz.cz/TP.html>
- [12] TARABA, Boleslav. *Nízkoteplotní oxidace a samovzněcování uhelné hmoty*. 1. vyd. Ostrava: Ostravská univerzita, 2003, 111 s. ISBN 80-7042-832-5.
- [13] NOVÁK, Ladislav. *Výzkum prostředků pro rychlou izolaci počínajícího samovznícení*. Ostrava-Radvanice: Vědeckovýzkumný uhelný ústav, 1979, 50 s., graf. příl.
- [14] PODSTAWKA, Tadeáš. *Studie monitoringu CO na TKV z hlediska rizik samovznícení a ochrany obsluhy*. 2012.
- [15] SOVA, Jan. Termovize v boji proti požárům – 3. díl. In: <http://www.pozary.cz> [online]. 2012 [cit. 2014-03-31]. Dostupné z: <http://www.pozary.cz/clanek/49616-termovize-v-boji-proti-pozarum-3-dil/>
- [16] SKÁLA, Zdeněk. *Palivové hospodářství*. 1. vyd. Brno: VUT, 1987, 153 s.

Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

- [17] Pulzní trysky. In: <http://www.mosasolution.com/> [online]. 2014 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.mosasolution.com/pulzni-trysky/aplikace>
- [18] ČSN 38 9683. *Návod na inertizaci jako prevence proti výbuchu*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [19] *Technická část zadávací dokumentace: Havarijní výpust' ze zásobníků prášku K4 v Závodě TPŘ*. Ostrava, 2010.
- [20] BIŽA, Jindřich. Výbuch brněnské teplárny na Špitálce - 1975-1978. In: <http://mojebrno.wz.cz/> [online]. 2012 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://mojebrno.wz.cz/inka--brno-dalsi-zajimavosti-teplarna-spitalka-1975-1978.html>
- [21] Šnekový dopravník. In: <http://www.kesner.cz/> [online]. 2010 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.kesner.cz/cz/produkt/snekovy-dopravnik-trubkovy-trsn/>
- [22] Pneumatické uzavírací ventily. In: <http://www.vivan.cz> [online]. 2014 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.vivan.cz/pneumaticke-uzaviraci-ventily>



## Seznam použitých zkratek a symbolů

$\alpha$	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
$\Delta\alpha$	[-]	Přisávání chladného vzduchu
$\rho_P$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota vodní páry
$\rho_{VZ}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota sušícího vzduchu
$\varphi$	[-]	Relativní vlhkost vzduchu
$\omega_{SS}$	[-]	Objemové podíly v suchých spalínách
$\omega_{SV}$	[-]	Objemové podíly ve vlhkých spalínách
A	[%]	Popelovina
c	[kJ/kg*K]	Měrná tepelná kapacita sušícího média
$C_{at}^{daf}$	[%]	Molární procenta obsahu uhlíku
$C_i$	[%]	Koncentrace kyslíku v inertním plynu
$C_f$	[%]	Koncentrace kyslíku po propláchnutí průtokem
$C_n$	[%]	Koncentrace kyslíku po n pročištění
$C_O$	[%]	Počáteční koncentrace kyslíku
$c_{su}$	[kJ/kg*K]	Měrná tepelná kapacita sušiny uhlí
$c_u$	[kJ/kg*K]	Měrná tepelná kapacita uhlí v závislosti na vlhkosti
$c_w$	[kJ/kg*K]	Měrná tepelná kapacita vody
CPT	[-]	Crossing Point Temperature
d	[-]	Dry – bezvodý stav
daf	[-]	Dry ashfree – stav bez vody a popela
$E_{mech}$	[kWh/t]	Měrná mlecí energie
F	[-]	Bezpečnostní koeficient
$f_a$	[-]	Uhlíková aromaticita
$h$	[kg <sub>pal</sub> /kg <sub>suš.</sub> vz.]	Koncentrace paliva v sušícím vzduchu
$h$	[%]	Hořlavina
$H_{at}^{daf}$	[%]	Molární procenta obsahu vodíku
$K_{mech}$	[-]	Koeficient určující část mechanické energie přeměněné v teplo
$M_1$	[kg]	Množství surového uhlí
$M_2$	[kg]	Množství uhlí po sušení
$M_r$	[-]	Molekulová hmotnost vodní páry
$M_u$	[t/h]	Výkon mlýna

---

Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

$M_W$	[kg/kg <sub>pal.</sub> ]	Množství vysušené vody ve formě vodní páry
$n$	[-]	Počet proplachovacích cyklů
$N^e$	[-]	Koncentrace volných radikálů
$OA$	[-]	Oxidačně alterované uhlí
$OKR$	[-]	Ostravsko – karvinský revír
$OKD$	[-]	Ostravsko – karvinské doly
$O_{at}^{daf}$	[%]	Molární procenta obsahu kyslíku
$\Delta O_2^{daf}$	[%]	Deficit kyslíku
$O_2^{pn}$	[-]	Koncentrace kyslíku v inertizujícím plynu
$O_2^{sm}$	[-]	koncentrace kyslíku ve směsi (vzduch + spaliny)
$O_2^{sm'}$	[%]	koncentrace kyslíku ve směsi vlivem odpaření vlhkosti
$O_2^{sm''}$	[%]	koncentrace kyslíku vlivem přísátého vzduchu
$O_{O_2,min}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Stechiometr. objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva
$O_{SS}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství suchých spalin
$O_{SS,min}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Stechiometrický objem suchých spalin
$O_{SV}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství vlhkých spalin
$O_{SV,H_2O,min}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Stechiometrický objem vodní páry ve spalinách
$O_{SV,min}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Stechiometrický objem vlhkých spalin
$O_{VS}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství suchého vzduchu
$O_{VS,min}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Stechiometrické množství suchého vzduchu
$O_{VV}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Skutečné množství vlhkého vzduchu
$O_{VV,H_2O,min}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Objem vodní páry ve spalovacím vzduchu
$O_{VV,min}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg]	Stechiometrické množství vlhkého vzduchu
$P$	[%]	Celková porozita
$p''$	[MPa]	Parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu
$p_{bar}$	[MPa]	Okolní tlak
$p_1$	[bar]	Nižší tlak při pročištění
$p_2$	[bar]	Vyšší tlak při pročištění
$Q$	[m <sup>3</sup> /hod]	Rychlost průtoku inertního plynu
$Q_i^r$	[kJ/kg]	Výhřevnost paliva
$Q_5$	[kW]	Ztráta tepla do okolí jednotlivých typů mlýnů
$q_5$	[kJ/kg]	Ztráta tepla do okolí
$q^{30}$	[J/g]	Oxidační teplo

---

Návrh zhašení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

$q_{fvz}$	[kJ/kg]	Citelné teplo přísátým vzduchem
$q_{mech}$	[kJ/kg]	Teplo vznikající při mletí
$q_{pal}$	[kJ/kg]	Citelné teplo paliva
$q_{pr}$	[kJ/kg]	Teplo odváděné práškem
$q_{sm}'$	[kJ/kg]	Citelné teplo sušícího média
$q_{sm}''$	[kJ/kg]	Teplo odváděné sušícím médiem
$q_{výp}$	[kJ/kg]	Teplo potřebné na odpaření vlhkosti paliva
$r$	[-]	Real – původní stav
$R$	[-]	Minimální poměr tlaků
$t'$	[°C]	Teplota sušícího média na vstupu do mlýna
$t''$	[°C]	Teplota sušícího média na výstupu z mlýna
$\Delta t$	[°C]	Ochlazení plynu v mlýnském okruhu
$t$	[hod]	Doba potřebná pro propláchnutí
$t_u$	[°C]	Teplota uhlí
$t_{vz}$	[°C]	Teplota vzduchu
$T_0$	[°C]	Počáteční teplota
$T^d$	[s/mm]	Doba, za kterou prodifunduje plyn do 1 mm uhlí
$T_{ks}$	[°C]	Kritická teplota samovznícení
TKV	[-]	Teplárna Karviná
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Objem zásobníku uhelného prášku
$V_m$	[dm <sup>3</sup> /mol]	Molární objem vodní páry
$V_{pn}$	[m <sup>3</sup> ]	objem inertizujícího plynu (spalin)
$V^{CO}$	[ml/kg <sub>uhlí</sub> ]	Vývin oxidu uhelnatého
$V^{daf}$	[%]	Obsah prchavých látek
$V^p$	[cm <sup>3</sup> /g]	Objem pórů
$W$	[%]	voda
$\Delta W$	[kg/kg]	hmotnost odpařené vlhkosti z 1 kg surového uhlí
$\Delta W'$	[m <sup>3</sup> /kg <sub>pal</sub> ]	objem vodní páry z 1 kg paliva
$\Delta W''$	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>s.v.</sub> ]	objem vodní páry na 1 m <sup>3</sup> sušícího vzduchu
$W^{pr}$	[%]	Vlhkost prášku
$W^r$	[%]	Vlhkost surového uhlí

---

Návrh zhášení zahořelého paliva v mlýnském okruhu kotle na Teplárně Karviná

---

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Trubnatý mlýn v kotelně Teplárny Karviná.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 Zjednodušené schéma zauhlování .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3 Výsypky zásobníku uhelného prášku .....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4 Znázornění jednotlivých stavů.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 5 Systém Antidet .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6 Schéma umístění membrán a protivýbuchové ochrany Antidet .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 7 Termovize .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 8 Určení <math>\Delta W</math> .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 9 Možná řešení situací při samovznícení paliva v zásobníku uhelného prášku .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 10 Schematické znázornění systému pulzních trysek.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 11 Aplikace rozvodu tlakového vzduchu na betonové stěně zásobníku.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 12 Mlýnský okruh TKV a jeho inertizace spaliny.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 13 Pohled na výsypky .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 14 Výpust' ze zásobníku uhelného prášku přes čajník .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 15 Výbuch kotelního teplárny Špitálka .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 16 Šnekový dopravník.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 17 Uzavírací pneumatické ventily .....</i>	<i>54</i>

## Seznam grafů

<i>Graf 1 Závislost rychlosti oxidace <math>v^{ox}</math> na teplotě uhlí <math>T</math> v Arrheniových souřadnicích .....</i>	<i>24</i>
<i>Graf 2 Závislost uhlíkové aromaticity <math>f_a</math> na obsahu uhlíku v hořlavině.....</i>	<i>27</i>
<i>Graf 3 Závislost vývinu oxidu uhelnatého při mletí <math>V^{CO}</math> na obsahu uhlíku v hořlavině <math>C^{daf}</math> ....</i>	<i>28</i>
<i>Graf 4 Průběhy záv. teplota vs. čas met. adiabatické ox. při různých poč. teplotách .....</i>	<i>30</i>
<i>Graf 5 Termografický záznam z měření metodou CPT .....</i>	<i>31</i>

## Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Parametry kotle na TKV.....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2 Vybrané vlastnosti paliv .....</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 3 Prvkové složení černého uhlí z OKD.....</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 4 Parciální tlak vodní páry v závislosti na teplotě .....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 5 Závislost optimálního přebytku vzduchu dle typu ohniště.....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 6 Vybrané vlastnosti uhlí na dole Dukla .....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 7 Rozmezí hodnot Grahamova indexu .....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 8 Rozdělení náchylnosti uhlí k samovznícení .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 9 Hodnoty oxidačních tepel .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 10 Měrné tepelné kapacity spalin v závislosti na teplotě .....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 11 Koeficient určující část mechanické energie přeměněné v teplo.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 12 Koeficient určující přisávání chladného vzduchu .....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 13 Měrné tepelné kapacity sušiny vybraných paliv .....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 14 Ztráta tepla do okolí .....</i>	<i>40</i>

## Seznam příloh

Výkres č. 1	Konstrukční úpravy zásobníku uhelného prášku	A3
Výkres č. 2	Instalace šnekových dopravníků	A3
Výkres č. 3	Pátevní rozvod	A3